

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS MECÁNICOS

TEMA:
ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE CORTE Y
GEOMETRÍA CON HERRAMIENTA DE ACERO RÁPIDO EN PROCESOS DE
MECANIZADO EN EL POLÍMERO POLIAMIDA 6.

AUTORES:
CARVAJAL HERNÁNDEZ CHRISTIAN FERNANDO
COCHA AJILA JUAN JAVIER

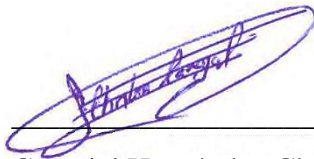
TUTOR:
QUITIAQUEZ SARSOZA RENÉ PATRICIO

Quito, agosto de 2018

CESIÓN DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Carvajal Hernández Christian Fernando, con documento de identificación N° 172408734-9 y Cocha Ajila Juan Javier, con número de identificación N° 220007974-3, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE CORTE Y GEOMETRÍA CON HERRAMIENTA DE ACERO RÁPIDO EN PROCESOS DE MECANIZADO EN EL POLÍMERO POLIAMIDA 6.”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Mecánicos en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En la aplicación de la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital en la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Carvajal Hernández Christian Fernando

C.I. 1724087349



Cocha Ajila Juan Javier

C.I. 2200079743

Quito, agosto del 2018.

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el proyecto de titulación, “ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE CORTE Y GEOMETRÍA CON HERRAMIENTA DE ACERO RÁPIDO EN PROCESOS DE MECANIZADO EN EL POLÍMERO POLIAMIDA 6.” realizado por Carvajal Hernández Christian Fernando y Cocha Ajila Juan Javier, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, agosto de 2018.



Quitiaquez Sarsoza René Patricio

C.I. 171059726-9

DEDIDATORIA

Primero a Dios por permitirme culminar una meta y una etapa de mi vida, a mis queridos padres Luis Cocha y Segunda Ajila por brindarme su incesante apoyo y comprensión, a mi hermano Gustavo Cocha por su compañía y ejemplo de hombre de bien, a mi hermana Daniela Cocha por su constante atención y a mi querida sobrina Yahana Montalván.

Juan Cocha

Este trabajo lo dedico a mi querida madre Rosario Hernández por su valiosísimo esfuerzo, apoyo incondicional y amor depositado en mi persona; además, de agradecerle por sus enseñanzas de constancia, responsabilidad, respeto y honestidad para ayudarme a ser un hombre de bien.

Christian Carvajal

AGRADECIMIENTO

Nuestros sinceros agradecimientos para el ingeniero Patricio Quitiaquez por su apoyo y confianza depositada en la realización de este proyecto, además de sus valiosos conocimientos compartidos.

A la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana formada por docentes, quienes han compartido con nosotros sus conocimientos y su valiosa experiencia, tanto para nuestro crecimiento profesional como personal.

ÍNDICE

CESIÓN DERECHOS DE AUTOR	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR	ii
DEDIDATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE	v
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT	xviii
INTRODUCCIÓN	xviii
ANTECEDENTES.....	1
CAPÍTULO I.....	4
GENERALIDADES	4
1.1 Propiedades mecánicas de los materiales	4
1.1.1. Esfuerzo a la tracción	4
1.1.2. Dureza	4
1.2. Polímeros.....	5
1.2.1. Poliamidas	5
1.2.2. Termoplásticos	6
1.2.3. Plásticos termofijos	6
1.3. Tipos de Poliamida.....	6
1.3.1. Poliamida 6 extruido (Grilón natural - blanco)	6
1.3.2. Poliamida 6 extruido (Grilón Negro)	7
1.3.3. Poliamida 6 + 30% GF (Grilón Grafito)	8
1.3.4. Obtención – Procesamiento	9

1.3.5.	Aplicaciones.....	9
1.3.6.	Propiedades	10
1.4.	Material de referencia para estudio	10
1.4.1.	Aluminio	10
1.4.2.	Cobre	12
1.4.3.	Bronce	12
1.4.4.	Comparación de materiales de referencia	13
1.5.	Torno	14
1.5.1.	Torno Emcomat 17D.....	15
1.6.	Operaciones del torno.....	17
1.6.1.	Cilindrado.....	17
1.6.2.	Refrentado	17
1.7.	Parámetros de corte	18
1.7.1.	Velocidad de corte.....	18
1.7.2.	Avance de herramienta.....	19
1.7.3.	Profundidad de mecanizado	20
1.7.4.	Número de revoluciones	20
1.7.1.	Distribución de carga en corte de metales.....	20
1.8.	Herramienta de trabajo	21
1.8.1.	Cuchilla de acero rápido HSS	21
1.8.2.	Clasificación:.....	21
1.8.3.	Herramienta seleccionada	22
1.8.4.	Geométrica de las herramientas	22
1.8.5.	Herramientas de desbaste	23
1.8.6.	Cilindrado.....	24

1.8.7.	Refrentado	26
1.9.	Afilado de cuchillas de corte	28
1.10.	Máquina afiladora	28
1.10.1.	Afiladora mecánica.....	28
1.11.	Acabado superficial e integridad superficial	29
1.11.1.	Textura y rugosidad de una superficial	29
1.11.2.	Integridad de la superficie	31
1.11.3.	Representación de la capa de mecanizado.....	32
1.11.4.	Categorización rugosidad superficial	33
1.12.	Rugosímetro.....	34
1.12.1.	Mitutoyo SJ 210	34
1.12.2.	Signo de mecanizado.....	36
1.13.	Método Taguchi.....	36
1.13.1.	Aplicación del método Taguchi	37
1.13.2.	Arreglo ortogonal	39
1.14.	Análisis estadístico	40
1.14.1.	Análisis de varianza ANOVA	40
1.14.2.	Términos e identificación	41
1.14.3.	Varianza.....	41
1.14.4.	Prueba F.....	42
1.14.5.	Porcentaje de influencia	42
1.14.6.	Grados de libertad	43
CAPÍTULO II		44
OBTENCIÓN PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y DE MECANIZADO		44
2.1.	Obtención de Cuchilla de cilindrado	44

2.1.1.	Elección de geometría general para cuchillas de cilindrado.	44
2.1.2.	Valores numéricos de ángulos de referencia.....	44
2.1.3.	Propuesta de ángulos para cuchillas para cilindrado.....	45
2.1.4.	Definición de parámetros de mecanizado de referencia	45
2.1.5.	Profundidad de pasada A_p	46
2.1.6.	Revoluciones por minuto:	47
2.1.7.	Avance:	47
2.1.8.	Experimento	48
2.1.9.	Mecanizado de probetas	51
2.1.10.	Medición de rugosidades.	51
2.1.11.	Análisis de resultados.	52
2.1.12.	Resultados de ensayos.	52
2.1.13.	Resultados de Rugosidad vs rpm.....	55
2.1.14.	Resultados de aproximación cuchilla de cilindrado	58
2.1.15.	Resultados obtenidos.	58
2.1.16.	Herramienta seleccionada.....	60
2.2.	Optimización de la cuchilla de cilindrado	61
2.2.1.	Aplicación de método Taguchi	61
2.2.2.	Definición de parámetros geométricos sus niveles	61
2.2.3.	Selección y diseño de arreglo ortogonal	62
2.2.4.	Resultados del experimento	65
2.2.5.	Aplicación del método ANOVA.....	68
2.2.6.	Porcentaje de influencia	68
2.2.7.	Evaluación de la media de cada nivel	70
2.2.8.	Parámetros óptimos	71

2.2.9.	Ejemplo de cálculo del factor A.....	71
2.3.	Optimización de parámetros de corte cilindrado.....	73
2.3.1.	Aplicación método Taguchi	73
2.3.2.	Definición de factores y niveles.....	73
2.3.3.	Selección y diseño del arreglo ortogonal	74
2.3.4.	Resultados del experimento	76
2.3.5.	Resultados método ANOVA.....	79
2.3.6.	Porcentaje de influencia	79
2.3.7.	Evaluación de la media de cada nivel	79
2.3.8.	Parámetros óptimos	80
2.3.9.	Cálculo de velocidad de corte	81
2.4.	Obtención de cuchilla de refrentado.....	83
2.4.1.	Selección de geometría general para cuchillas de refrentado	83
2.4.2.	Parámetros geométricos iniciales	84
2.4.3.	Definición de parámetros y niveles.....	85
2.4.4.	Resultados del experimento	87
2.4.5.	Resultados método ANOVA.....	90
2.4.6.	Porcentaje de influencia	90
2.4.7.	Evaluación de la media de cada nivel	91
2.4.8.	Parámetros óptimos.....	92
2.5.	Comprobación de parámetros.....	92
2.5.1.	Parámetros de comprobación	92
2.5.2.	Cálculo de RPM	93
2.5.3.	Ensayos de comprobación.....	94
2.5.4.	Cuchilla de cilindrado 1	95

2.5.5.	Cuchilla de cilindrado 2	98
2.5.6.	Cuchilla de refrentado 1	101
2.5.7.	Cuchilla de refrentado 2	104
2.6.	Análisis de costos	108
2.6.1.	Costos directos	108
2.6.2.	Costos indirectos	110
2.6.3.	Costo Total	110
CONCLUSIONES		111
RECOMENDACIONES		116
REFERENCIAS		117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas de poliamida 6 [7].	9
Tabla 2. Características de la poliamida 6 [9].	10
Tabla 3. Propiedades del aluminio [12].	11
Tabla 4. Materiales con propiedades mecánicas cercanas a la Poliamida 6 [13].	13
Tabla 5. Datos técnicos torno EMCOMAT 17D [15].	15
Tabla 6. Rango de velocidades [15].	16
Tabla 7. Avance automático longitudinal [15].	16
Tabla 8. Avance automático transversal [15].	17
Tabla 9. Velocidades de corte con útiles de acero rápido [20].	19
Tabla 10. Avances para operaciones de torneado [20].	19
Tabla 11. Contenido y funciones de elementos aleados en HSS [23].	22
Tabla 12. Orientación rugosidades [27].	33
Tabla 13. Categorización de rugosidades [19].	34
Tabla 14. Diseño Taguchi L8 [33].	40
Tabla 15. Términos involucrados análisis ANOVA [37].	41
Tabla 16. Ángulos de herramienta de torneado según el material de referencia [23].	45
Tabla 17. Ángulos de referencia cuchilla cilindrado.	45
Tabla 18. Parámetros de mecanizado del material de referencia [19].	46
Tabla 19. Resumen de parámetros y niveles experimentales de la primera etapa	49
Tabla 20. Arreglo Experimental para primera etapa.	50
Tabla 21. Parámetros de corte calculados y disponibles en torno Emcomat 17D	51
Tabla 22. Rugosidades de ensayos primera parte.	53
Tabla 23. Rugosidades de ensayos continuación.	54
Tabla 24. Resultados aproximación cuchilla cilindrado.	58
Tabla 25. Parámetros geométricos iniciales para cuchilla de cilindrado.	59
Tabla 26. Parámetros de mecanizado iniciales.	59
Tabla 27. Parámetros geométricos y niveles	62
Tabla 28. Arreglo ortogonal L27	63
Tabla 29. Datos y resultados obtenidos de parámetros de mecanizado.	65
Tabla 30. Mejores resultados de cada ángulo de punta.	67

Tabla 31. Cuchilla con mejor rugosidad del arreglo L27 optimización de cuchilla.	67
Tabla 32. Resultados de método ANOVA en parámetros geométricos cuchilla cilindrado.....	68
Tabla 33. Influencia de los factores geométricos en función de la rugosidad.	68
Tabla 34. Hipótesis estadística del Parámetro A.....	68
Tabla 35. Tabla de distribución normal de FISHER $F_{0,5} (f_1, f_2)$, 95% de confianza [41].....	69
Tabla 36. Evaluación de la media de cada nivel.	70
Tabla 37. Parámetros óptimos resultantes del método Taguchi.....	71
Tabla 38. Factores y niveles.....	74
Tabla 39. Interacciones de los niveles entre factores.....	75
Tabla 40. Datos y resultados obtenidos de parámetros de mecanizado.	76
Tabla 41. Menor rugosidad en parámetros de mecanizado en cilindrado.....	78
Tabla 42. Resultados de método ANOVA en parámetros de mecanizado cilindrado.	79
Tabla 43. Influencia de parámetros de mecanizado.	79
Tabla 44. Evaluación de la media de cada nivel.	79
Tabla 45. Parámetros óptimos resultantes del método Taguchi.....	80
Tabla 46. Tabla de resultados 1.....	81
Tabla 47. Tabla de resultados 2.....	82
Tabla 48. Tabla de resultados 3.....	82
Tabla 49. Tabla de resultados 4.....	82
Tabla 50. Valores iniciales.....	84
Tabla 51. Factores y niveles.....	85
Tabla 52. Arreglo ortogonal geometría cuchilla refrentado.....	86
Tabla 53. Resultados de mecanizado.	87
Tabla 54. Menor rugosidad obtenida.	90
Tabla 55. Resultados de método ANOVA en parámetros geométricos refrentado	90
Tabla 56. Influencia de los factores.	90
Tabla 57. Evaluación de la media de cada nivel.	91
Tabla 58. Parámetros óptimos.....	92
Tabla 59. Parámetros de comprobación.....	92

Tabla 60. Parámetros de mecanizado para cilindrado.....	93
Tabla 61. Parámetros de mecanizados para refrentado.....	94
Tabla 62. Parámetros de mecanizado y rugosidades obtenidas con herramienta de cilindrado 1	95
Tabla 63. Caracterización de ensayos con avance 0,112 mm/rev y cuchilla de cilindrado 1.....	96
Tabla 64. Caracterización de ensayos con avance 0,337 mm/rev y cuchilla de cilindrado 1.....	97
Tabla 65. Caracterización de ensayos con avance 0,562 mm/rev y cuchilla de cilindrado 1.....	97
Tabla 66. Parámetros de mecanizado y rugosidades obtenidas con herramienta de cilindrado 2	98
Tabla 67. Caracterización de ensayos con avance 0,112 mm/rev y cuchilla de cilindrado 2.....	99
Tabla 68. Caracterización de ensayos con avance 0,337 mm/rev y cuchilla de cilindrado 2.....	100
Tabla 69. Caracterización de ensayos con avance 0,562 mm/rev y cuchilla de cilindrado 2.....	100
Tabla 70. Parámetros de mecanizado y rugosidades obtenidas con herramienta de refrentado 1	101
Tabla 71. Caracterización de ensayos con avance 0,118 mm/rev y cuchilla de refrentado 1.	102
Tabla 72. Caracterización de ensayos con avance 0,348 mm/rev y cuchilla de refrentado 1.	102
Tabla 73. Caracterización de ensayos con avance 0,406 mm/rev y cuchilla de refrentado 1.	103
Tabla 74. Parámetros de mecanizado y rugosidades obtenidas con herramienta de refrentado 2	104
Tabla 75. Caracterización de ensayos con avance 0,118 mm/rev y cuchilla de refrentado 2.	105

Tabla 76. Caracterización de ensayos con avance 0,348 mm/rev y cuchilla de refrentado 2.	106
Tabla 77. Caracterización de ensayos con avance 0,406 mm/rev y cuchilla de refrentado 2.	106
Tabla 78. Costo de materiales utilizando el método Taguchi.	108
Tabla 79. Costos por servicios de equipos.	109
Tabla 80. Costos indirectos	110
Tabla 81. Costo total de la Tesis	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de fuerzas en arranque de viruta de metales [11].	21
Figura 2. Principales ángulos de herramienta de torneado [14].	23
Figura 3. Cuchilla de desbaste derecha	24
Figura 4. Representación de cilindrado	24
Figura 5. Cuchilla de cilindrado derecha.	24
Figura.6. Vista superior de cuchilla de cilindrado	25
Figura 7. Vista lateral de cuchilla de cilindrado.	25
Figura 8. Representación de cuchilla de refrentado.	26
Figura 9. Cuchilla de refrentado	26
Figura 10. Vista superior de la cuchilla de cilindrado	27
Figura 11. Vista frontal cuchilla de refrentado.	27
Figura 12. Afiladora mecánica	29
Figura 13. Representación esquemática de rugosidad superficial [19].	30
Figura 14. Rugosidad promedio [18].	30
Figura 15. Parámetros de rugosidad [25].	31
Figura 16. Rugosímetro Mitutoyo SJ 210 [28].	35
Figura 17. Especificaciones de estado [27].	36
Figura 18. Proceso de aplicación método Taguchi [30].	38
Figura 19. Cuchilla de cilindrado de punta simétrica	44
Figura 20. Cuchilla de cilindrado izquierda.	44
Figura 21. Puntos de medición en probetas	51
Figura 22. Medición de rugosidades.	52
Figura 23. Rugosidades obtenidas con cuchilla de cilindrado de punta 30°	55
Figura 24. Rugosidades obtenidas con cuchilla de cilindrado de punta 35°	56
Figura 25. Rugosidades obtenidas con cuchilla de cilindrado de punta 40°	56
Figura 26. Rugosidades obtenidas con cuchilla de cilindrado de punta 45°	57
Figura 27. Rugosidades obtenidas con cuchilla de cilindrado de punta 60°	57
Figura 28. Número de ensayo vs. Rugosidad optimización de cuchilla de cilindrado	66
Figura 29. Prueba de hipótesis para ángulo de punta.	69
Figura 30. Efecto de la media de cada nivel cuchilla de cilindrado	70

Figura 31. Rugosidad vs. rpm, avance 0,112 mm/rev.....	77
Figura 32. Rugosidad vs. rpm, avance 0,337 mm/rev.....	77
Figura 33. Rugosidad vs. rpm, avance 0,562 mm/rev.....	78
Figura 34. Efecto de la media de cada parámetro de mecanizado.	80
Figura 35. Cuchilla de refrentado seleccionada.	83
Figura 36. Vista superior de la cuchilla de cilindrado	83
Figura 37. Vista frontal cuchilla de refrentado	84
Figura 38. Rugosidades vs. ángulo de punta 87 °	88
Figura 39. Rugosidades vs. ángulo de punta 85 °	89
Figura 40. Rugosidades vs. ángulo de punta 83 °	89
Figura 41. Efecto de la media de los factores de la cuchilla de refrentado.....	91
Figura 42. Rugosidad vs. diámetro en función del avance con cuchilla de cilindrado 1.96	
Figura 43. Rugosidad vs. diámetro en función del avance con cuchilla de cilindrado 2.99	
Figura 44. Rugosidad vs. diámetro en función del avance con cuchilla de refrentado 1	102

RESUMEN

El presente estudio está dirigido a obtener los parámetros geométricos de cuchillas de cilindrado y refrentado para posteriormente determinar los parámetros óptimos de mecanizado del material de estudio poliamida 6 y finalmente determinar la velocidad de corte de dicho material con el fin de obtener rugosidades mínimas en procesos de desbaste y así lograr un salto de calidad en la industria mediante la estandarización de procesos de manufactura. Esto se ve reflejado en reducción de tiempos de mecanizado lo que a su vez reducirá costos de producción.

La poliamida 6 como material de estudio se lo considera una materia prima de gran alcance, dado que su campo de uso abarca muchas áreas en distintas industrias, por ejemplo, se puede usar para construir engranajes, cojinetes tornillos sin fines, entre otros, dado que posee características sobresalientes como resistencia a los agentes químicos, resistencia a los óxidos, su buena maquinabilidad, bajo peso y estabilidad térmica entre 10° C hasta 100° C lo hacen un material de grandes prestaciones.

Los ensayos y el análisis de resultados son desarrollados mediante la metodología Taguchi la cual permite reducir el número de ensayos del total posible a un número reducido mediante un arreglo ortogonal y así obtener los resultados a ser analizados, a partir de dichos resultados y por medio del análisis ANOVA se puede calcular el porcentaje de influencia de cada parámetro de estudio y obtener los niveles óptimos de cada parámetro para obtener la rugosidad mínima.

Una vez obtenidos los resultados se concluye que las geometrías óptimas de la herramienta tanto de cilindrado como de refrentado descargan el material desprendido fuera de la zona de trabajo sin producir peligro para el operario, el parámetro de mecanizado de mayor influencia es el avance con un 98 % y el acabado superficial que se pudo conseguir con los parámetros obtenidos en la presente tesis es de calidad N16.

Palabras clave: parámetros, corte, geometría, herramienta, polímero, poliamida 6

ABSTRACT

The present study is carried out to obtain the optimal geometry parameters for turning and facing operations, for later get the optimal parameters for polyamide 6 the material for this study and finally determine the cutting speed in order to obtain minimum roughness in material removing processes and thus achieve a quality leap in the industry through the standardization of manufacturing processes, it is evidenced in the reduction of machining time processes and consequently the reduction of production costs.

Polyamide 6 as material of study is considered a powerful raw material, its field of use covers many areas in different industries, for example, it can be used to mechanize gears, bearings, endless screws, among others, due to its outstanding characteristics such as resistance to chemical agents, resistance to oxides, good machinability, low weight and thermal stability between 10 ° C to 100 ° C make it a high performance material.

The trials and the analysis of results are developed using the Taguchi methodology which allows to reduce the number of trials of the whole possible combinations to a reduced number of trials using an orthogonal array and thus get the results to be analyzed, the results were treated using ANOVA analysis, this method calculates the percentage of influence of each parameter and then obtain the optimal levels to achieve the minimum roughness.

Once the results are obtained, it concluded that the optimal geometry of the tool, both for turning and facing, discharges the detached material outside the working area without causing danger to the operator, the cutting parameter of greater influence is feed with a 98 % and better surface finish could be achieved with the parameters obtained in this study is categorized as N16 quality.

Keywords: parameters, cutting, geometry, tool, polymer, polyamide 6

INTRODUCCIÓN

La poliamida 6 es un material muy utilizado en campos industriales como: automotriz, alimenticio, aéreo entre otros, desplazando a materiales convencionales metálicos debido a sus características tribológicas, buena rigidez, tenacidad, buena relación esfuerzo peso, resistencia al desgaste, estabilidad dimensional, amortiguación entre otros. Como aplicaciones específicas son anillos, sellos para plantas de agua, bocines, ejes, poleas entre otros.

La herramienta utilizada es acero rápido de alta velocidad (HSS) donde el elemento de mayor influencia en sus propiedades es el Molibdeno, además de ser la de mayor demanda en Ecuador y la facilidad de generar geometrías como es el caso de estudio.

Para iniciar la investigación se procede a tomar un material de referencia el cual es Aluminio ya que su esfuerzo a la tracción tiene un valor cercano con el de la poliamida 6 en comparación a otros materiales como el bronce y el cobre.

La metodología utilizada es Taguchi debido a sus características de diseñar experimentos en función de varios parámetros y niveles de estudio, como es el presente caso.

El estudio parte desde la aproximación de parámetros geométricos donde se estudia la condición de desprendimiento de la viruta, para lo cual se requiere que la misma sea expulsada fuera del área de trabajo, posteriormente se optimiza la geometría de la herramienta mediante la ejecución de la metodología Taguchi donde se obtiene la influencia de cada parámetro así como se determina la geometría optima, posterior a esto se procede a determinar los parámetros óptimos de mecanizado aplicando nuevamente la metodología Taguchi; finalmente se calcula la velocidad de corte utilizando los parámetros óptimos de mecanizado para finalmente validarlos.

ANTECEDENTES

Uno de los problemas más frecuentes en la producción de piezas mecanizadas, es obtener la calidad superficial predefinida en la Poliamida 6 según su aplicación, puesto que no existe información técnica y detallada de parámetros de corte en la máquina herramienta torno convencional, tales como avance, profundidad y velocidad de corte, utilizando como herramientas cuchillas de acero rápido (HSS) para operaciones de cilindrado y refrentado, donde cada una de estas posee características geométricas propias.

La creación de bienes está ligado a un proceso de manufactura. Dentro de los procesos mencionados de la materia prima existen procesos sin arranque de viruta como soldadura, embutido, troquelado, recubrimientos superficiales, tratamientos térmicos entre otros, existe también procesos con arranque de viruta tales como fresado, rectificado, cepillado y en el caso de este estudio el torneado.

Este trabajo estudia el proceso de torneado enfocado en operaciones de cilindrado y refrentado donde se reducirá el diámetro y longitud para alcanzar la cota deseada en el desbaste; además, de obtener parámetros de corte: velocidad de corte, avance y profundidad. Como complemento a los resultados obtenidos se conocerá los ángulos de las cuchillas los cuales serán los óptimos dado que preservarán las propiedades de la herramienta y el material mecanizado.

La optimización de parámetros de corte y ángulos presenta un salto en la calidad para la industria dado que reduce los tiempos de mecanizado lo que a su vez reduce costos dado que se puede estandarizar procesos que aportan a mejores acabados superficiales.

El objetivo general es estudiar la influencia de los parámetros de corte y geometría de las herramientas acero rápido en procesos de mecanizado en el Polímero Poliamida 6.

Los objetivos específicos son:

- Definir parámetros de mecanizado, como: velocidad de corte, avance y profundidad, en operaciones de desbaste (cilindrado y refrentado).
- Establecer parámetros geométricos de las cuchillas HSS para las operaciones de desbaste en: cilindrado y refrentado.
- Establecer la metodología para el desarrollo de los ensayos.
- Evaluar parámetros de corte en Polímero poliamida 6 mediante ensayos.
- Identificar y clasificar los acabados superficiales obtenidos de cada proceso, en base a los parámetros de corte y geometría de la herramienta.
- Analizar el impacto económico de la utilización de los parámetros de mecanizado establecido, respecto a la forma convencional de mecanizar la poliamida 6 (grilón blanco).

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

La poliamida 6 es muy utilizada en la industria para construir elementos mecánicos como piñones sometidos a esfuerzos medianos; bocines, agitadores de leche los cuales pueden ser mecanizados en bronce o acero inoxidable, sin embargo, no se conocen parámetros de mecanizado para obtener acabados superficiales óptimos, dichos parámetros se deberán obtener mediante la referencia de velocidades de corte, avance y profundidad de corte de materiales existentes como el aluminio o bronce debido a que las características y propiedades son más próximas a la poliamida 6 que el acero, la obtención de dichos datos están sujetos a la optimización y preservación del material de la herramienta y del material mediante la estandarización de los ángulos de las cuchillas de torneado para cilindrado y refrentado para desbastado.

1.1 Propiedades mecánicas de los materiales

1.1.1. Esfuerzo a la tracción

Se refiere al esfuerzo al cual una barra está sometida, en el que en un extremo inferior existe una fuerza que tira hacia abajo, las fuerzas en el interior del material se encuentran en equilibrio, por lo tanto, en el extremo superior hay una fuerza de igual magnitud a la inferior, la cual ejerce una fuerza hacia arriba. Este esfuerzo de tracción existe a través de todo el material [1].

1.1.2. Dureza

Para el mecanizado con arranque de viruta de una pieza es sumamente importante considerar la dureza del material, lo cual es una medida de la resistencia que tiene un elemento a la deformación plástica localizada, como la penetración, la abrasión y el rayado [2].

Un elemento que es fácilmente penetrado o rayado se considera que tiene una dureza baja, de manera contraria si este es difícil de rayar o penetrar es de dureza alta.

Cabe resaltar que las medidas de dureza obtenidas por ensayos solamente son relativas. Es necesario tener precaución al momento de comparar las unidades de dureza de materiales que han sido obtenidos por distintas técnicas de ensayos las cuales son para cada tipo de material, las unidades cambian dependiendo del método con el que se obtuvo la dureza.

- Polímeros

Polímero se define como “muchas partes”. Por lo tanto a partir de esta definición al polímero se lo puede considerar como un elemento solido formado por varias partes o en otras palabras formado por múltiples unidades enlazadas químicamente [3].

1.1.3. Poliamidas

La poliamida es un termoplástico procesado mediante extrusión donde su estructura atómica presenta una cadena principal la cual contienen grupos de amida ordenados repetidamente. Son plásticos muy empleados en la ingeniería por sus propiedades mecánicas y físicas, conserva sus capacidades a elevadas temperaturas, tiene una buena dureza, soporta bien los ataques con sustancias químicas y una baja resistencia a la fricción [3].

Las poliamidas son una familia importante de los polímeros, que están formados por amidas (CO-NH) a partir del fenol. Los miembros más reconocidos son el *Grilón*, también conocido como Poliamidas, existen dos variedades la poliamida 6 y poliamida 6.6, (los números son códigos que indican el número de carbono en el monómero) [4].

En este material se puede hacer operaciones de arranque de viruta como: torneear, fresar, limar, cepillar, punzonar, entre otros.

1.1.4. Termoplásticos

Gran parte de los termoplásticos tienen una estructura constituida por largas cadenas principales de átomos de carbono, enlazados entre ellos de forma covalente [3]. En ocasiones a estos enlaces de la cadena principal también se les añade de forma covalente átomos de oxígeno, azufre o nitrógeno. Las largas cadenas moleculares en estos materiales están unidas entre sí por enlaces secundarios.

Para dar una forma determinada a los termoplásticos primero es necesario calentarlos, luego moldearlos y dejarlos enfriar para que de este modo conserven la figura proyectada. Una ventaja que presentan estos materiales es la facilidad para repetir el proceso de darles forma mediante calor y enfriamiento, sin que presenten una alteración de sus propiedades mecánicas y físicas.

1.1.5. Plásticos termofijos

Entre los termoplásticos existe la variedad de plásticos termofijos, los cuales adquieren una forma fijada permanentemente mediante reacción química, una desventaja que representan es que no se los puede reciclar, es decir no se puede volver a fundir y usar de nuevo, esto porque su estructura se deteriora o desgastan cuando alcanzan temperaturas de fusión o mayores. Al contrario de los termoplásticos, los plásticos termofijos se endurecen permanentemente mediante calor [3].

1.2. Tipos de Poliamida

1.2.1. Poliamida 6 extruido (Grilón natural - blanco)

Este tipo de Poliamida comúnmente llamado Grilón Blanco posee las propiedades generales del Grilón, a diferencia del Grilón negro y de grafito, sus usos son generales. Tiene propiedades mecánicas de muy alta calidad como su resistencia a la fricción, mecanizado simple y firmeza dimensional [5].

Es importante recalcar que esta variedad de la Poliamida 6 es la que se usará para desarrollar los ensayos del presente estudio.

Ventajas:

- Anti abrasivo
- Buena resistencia a la tensión y a compresión
- Absorbe muy bien los impactos
- Conserva sus características aún sometido a esfuerzos continuos
- No necesita lubricación
- Sus propiedades se conservan a través del tiempo
- Resistente a sustancias química.
- Resistencia a la corrosión, por lo que es aprobado para la industria alimenticia

Desventajas:

- Al estar en continuo contacto con líquidos absorbe humedad
- Sus propiedades cambian dependiendo de su estado seco o húmedo
- Las virutas que se forman al mecanizar pueden ser peligrosas por su elasticidad

1.2.2. Poliamida 6 extruido (Grilón Negro)

Además de las características generales del Grilón natural, esta variedad presenta propiedades especiales, el color es la característica más representativa, además sirve para diferenciarlo fácilmente de Grilón natural, el color se logra mediante la añadidura de colorantes y elementos especiales que le proporcionan propiedades auto lubricantes y una resistencia especial a rayos UV. Conserva resistencias mecánicas, mejores propiedades de deslizamiento a comparación del resto de los Grilón [6]. El color negro está dado por la presencia de di sulfuro de molibdeno [7].

Ventajas

- Por su capacidad auto lubricantes resulta un material económico
- Material anti abrasivo
- Buena resistencia a la tensión, compresión y a la fatiga

- Recomendable para partes que están expuestas a exteriores

Desventajas

- Al estar en continuo contacto con líquidos absorbe humedad
- Sus propiedades cambian dependiendo de su estado seco o húmedo
- Debido a la alta elasticidad del material los métodos de mecanizado automáticos no son factibles
- No conviene usarlos en la industria alimenticia

1.2.3. Poliamida 6 + 30% GF (Grilón Grafito)

Este Grilón especial se encuentra reforzado con 30% de fibra de vidrio y grafito, la adición de fibra de vidrio convierte al material con una resistencia muy alta a la abrasión, compresión y flexión. Este material es especializado para piezas que necesiten una resistencia extraordinaria al deterioro en comparación con otros tipos de Grilón [8].

Ventajas

- Resistencia extra al desgaste
- Buena resistencia a la tensión y compresión
- Resistente al deterioro a través del tiempo
- Conserva sus características aún sometido a esfuerzos continuos
- Resistencia a la intemperie
- Resistente a sustancias químicas

Desventajas

- No conviene usar en la industria alimenticia

En la Tabla 1 se detallan diferentes propiedades mecánicas de los tipos de poliamida 6.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de poliamida 6 [7]

Propiedad	Parámetro	Verde	Negro	Blanco
Esfuerzo a la tensión $[MPa]$	Prueba de tensión (50 mm/min)	76	80	80
Trabajo en temperatura $[^{\circ}C]$	Temperatura baja	130	170	170
Trabajo en temperatura $[^{\circ}C]$	Temperatura alta	100	100	100
Dureza $[MPa]$	Indentación por bola	159	170	170
Módulo de la elasticidad $[MPa]$	Prueba de tensión (50 mm/min)	3200	3200	3500

1.2.4. Obtención – Procesamiento

El proceso más utilizado para la obtención de las poliamidas por motivos económicos es el de fundición a temperaturas de alrededor del punto de fusión menores a los $180^{\circ}C$, para el conformado las técnicas más comunes en la mayoría de los Grilón son moldeo por inyección y por extrusión [3].

1.2.5. Aplicaciones

La poliamida 6 es un material muy empleado en casi todas las ramas de la ingeniería. Las aplicaciones más comunes en la industria son piezas que no necesitan lubricación como engranajes y cojinetes que además requieren una alta resistencia al impacto, una buena rigidez y elevada resistencia a la tracción, piezas mecánicas que deben trabajar a temperaturas altas y en contacto con hidrocarburos y disolventes químicos, en la industria eléctrica se usan en partes que deben estar sometidas a altas temperaturas. En la industria automotriz se encuentran aplicaciones muy generalizadas desde velocímetros hasta engranajes para limpiadores de parabrisas y camisas o bocines que se encuentran en contacto con otros elementos de igual o distintos materiales [3].

1.2.6. Propiedades

En la Tabla 2 se detallan las propiedades físicas y mecánicas del material poliamida 6.

Tabla 2. Características de la poliamida 6 [9]

Propiedad	Poliamida 6
	Nombre comercial
	Zytel
Gravedad específica	1,15
Resistencia a la tracción (MPa) ASTM D 638	55,4
Elongación para romper (%)	378
Módulo de flexión (MPa) ASTM D 790	59
Resistencia al impacto con muescas (kg/m) ASTM D 256	4,92
Dureza Shore D	74
Temperatura de fusión	222
Temperatura de degradación	440

1.3. Material de referencia para estudio

Debido a que la poliamida 6 (Grilón) no tiene parámetros de mecanizado tabulados como otros materiales tales como el acero, bronce, entre otros, se tomará un material de referencia el cual debe tener características mecánicas cercanas al grilón, esto con el fin de tener un punto de partida.

1.3.1. Aluminio

El aluminio tiene propiedades físicas que lo destacan frente a otros materiales como su bajo peso en relación al acero, resistencia a la corrosión, no es magnético y buena maquinabilidad lo cual lo hace uno de los materiales más utilizados en las industrias de ingenierías, en especial en la aviación, también se debe destacar que es un material económicamente barato debido a que es de los elementos más abundantes en la corteza terrestres y que además es de los más reciclados [10].

El aluminio y sus aleaciones son materiales que tienen propiedades generales que se acercan a las especificadas por la poliamida 6, entre estas propiedades están:

- Poco peso específico
- Excelente resistencia a la corrosión
- Buena conductividad eléctrica y térmica
- Resistencia ante ataques químicos
- Buena relación peso-resistencia
- Maquinabilidad
- No magnético [11].

El principal problema del aluminio es su baja resistencia mecánica, por esta razón el aluminio puro se combina con distintos elementos mediante fundición, forja y tratamientos térmicos para formar aleaciones con mejores propiedades mecánicas, como el módulo de elasticidad, resistencia a la tracción, dureza entre otros [10].

En la Tabla 3 se detallan las propiedades mecánicas del aluminio.

Tabla 3. Propiedades del aluminio [12]

Propiedad	Unidad	Magnitud
Densidad	kg/dm ³	2,69
Temperatura de fusión	°C	660
Resistencia a la tracción	kg/mm ²	12
Límite elástico	kg/mm ²	10
Alargamiento	%	11
Dureza	HB	15

1.3.2. Cobre

Las propiedades del cobre se asemejan al aluminio y sus derivados, por ejemplo, en muchas ocasiones al fabricar matrices de moldeo se suele reemplazar el aluminio por aleaciones de cobre debido a sus mejores propiedades térmicas. A nivel mundial son utilizados para construir cables para conducción de electricidad o producir calor en calderas. Los métodos de conformado más básicos son fundición y maquinado.

Las aleaciones del cobre se producen para mejorar sus propiedades mecánicas y físicas y poder aplicarlas en campos que requieren materiales con mejores atributos mecánicos, mejor conductividad térmica - calor o mejor resistencia a la corrosión, entre otras características [11].

1.3.3. Bronce

El material base para la fabricación del bronce es el cobre, el material secundario más común es el estaño, siempre en una proporción del 3% al 20%, sin embargo existen aleaciones de bronce que se pueden incluir otros metales secundarios para obtener diferentes características mecánicas y físicas, como el bronce al aluminio, bronce al berilio, o bronce al fósforo, por lo general los bronce tienen una buena dureza y resistencia a la tracción, son muy empleadas en la industria mecánica en especial en piezas que están sometidas a rozamiento, además tiene buena resistencia a la corrosión [11].

1.3.4. Comparación de materiales de referencia

A continuación, en la Tabla 4 se detallan las propiedades mecánicas de mayor importancia entre los materiales de referencia antes expuestos.

Tabla 4. Materiales con propiedades mecánicas cercanas a la Poliamida 6 [13]

		Propiedad		Aplicaciones típicas
Material		Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	
Poliamida 6	Grilón	55 - 83	1,4 - 2,8 (GPa)	
Bronce	Fosforado de libre maquinado (C54400)	300 - 520	130 - 435	Cojinetes, bujes, engranajes, piñones, ejes, arandelas de empuje y piezas de válvulas.
Aluminio	5052 (A95052)	190 - 260	90 - 215	Trabajo con láminas metálicas, tubos y accesorios hidráulicos.
Cobre	Latón de libre maquinado (C36000)	340 - 470	125 - 310	Engranajes, piñones, piezas para máquinas automáticas generadoras de tornillos de alta velocidad.

Para realizar el experimento se toma como material de acercamiento el aluminio dado que su esfuerzo a la tensión máximo es muy bajo en relación al cobre y bronce, sin embargo,

las resistencias mostradas están lejos de la poliamida 6 por lo tanto el aluminio es el material escogido como referencia debido que tiene la resistencia más baja de entre los tres dado que no existen parámetros de estudio para el material de estudio.

1.4. Torno

Máquina herramienta para arrancar viruta del material, el cual trabaja por medio de un movimiento de rotación mediante el uso de un útil o útiles de corte. El trabajo del útil de corte está asociado a movimientos específicos:

- Si el movimiento es paralelo al eje de rotación del material es cilindrado.
- Si el movimiento es transversal al eje de rotación es refrentado [14].

Los trabajos más comunes son:

- Cilindrado
- Refrentado
- Roscado
- Cilindrado cónico

1.4.1. Torno Emcomat 17D

Este torno posee características tales como: control numérico, velocidad constante, control de velocidad variable, pantalla digital para visualizar el plano del material, así como sus coordenadas.

En la Tabla 5 se detallan datos técnicos de la máquina herramienta torno Emcomat 17D.

Tabla 5. Datos técnicos torno EMCOMAT 17D [15]

División del anillo índice de los volantes	Unidades	EM17		
Carro longitudinal	[mm]	0,2		
Carro transversal	[mm]	0,05		
Carro superior	[mm]	0,025		
Pesos admitidos en piezas				
De manera volante	[kg]	50		
Con contrapunta	[kg]	150		
Conexión eléctrica				
		3/PE	230	AC
Alimentación de tensión	[V]	3/PE	400	AC
		3/PE	460	AC
Frecuencia	[Hz]	50/60		
Dimensiones de la máquina				
Longitud total	[mm]	1650		
Alto total	[mm]	1290		
Anchura total	[mm]	1016		
Husillo principal sobre el suelo	[mm]	1103		
Peso total de la máquina	[kg]	725		

En la Tabla 6 se detallan los rangos de velocidades disponibles del husillo del torno.

Tabla 6. Rango de velocidades [15]

Identificación	Velocidad	Unidad
A1	40-130	<i>rpm</i>
B1	110-360	<i>rpm</i>
A2	310-1070	<i>rpm</i>
B2	870-3000	<i>rpm</i>

La Tabla 7 muestra los avances automáticos disponibles para el carro longitudinal.

Tabla 7. Avance automático longitudinal [15]

Combinación de ruedas	E	F	G	H	
40-120-100- 80	0,045	0,090	0,180	0,360	3
	0,056	0,112	0,225	0,450	4
	0,070	0,140	0,281	0,562	5
	0,084	0,168	0,337	0,675	6
	0,098	0,196	0,393	0,787	7
40-120-80- 100	0,067	0,135	0,270	0,540	6
	0,078	0,157	0,315	0,630	7

La Tabla 8 muestra los avances automáticos disponibles para el carro transversal.

Tabla 8. Avance automático transversal [15]

Combinación de ruedas	E	F	G	H	
40-120-80- 100	0,023	0,046	0,029	0,185	3
	0,029	0,058	0,118	0,232	4
	0,036	0,072	0,145	0,290	5
	0,043	0,087	0,174	0,348	6
	0,050	0,101	0,203	0,406	7
40-120-100- 80	0,034	0,069	0,139	0,278	6
	0,040	0,081	0,162	0,324	7

1.5. Operaciones del torno

1.5.1. Cilindrado

La operación de cilindrado mecaniza un material a un diámetro o varios diámetros determinados. El proceso de mecanizado inicia con una profundidad de pasada, avance requerido, la herramienta adecuada, con un desplazamiento automático o manual, por lo general se realizan dos pasadas de desbaste hasta llegar cerca de la medida deseada y una pasada final con una baja profundidad para el acabado para así lograr una superficie lisa. Los parámetros involucrados en el proceso de torneado son: número de revoluciones a la que gira el material, velocidad de corte, profundidad de pasada, avance, grado de acabado [16].

1.5.2. Refrentado

Esta operación genera superficies planas las cuales deben ser perpendiculares al eje de rotación, el movimiento de la herramienta se da desde el exterior hacia el interior, este desplazamiento es el más común [17]. El refrentado está enfocado al desarrollo de superficies planas en el torno el cual puede ser completo, parcial. La herramienta tiene dos disposiciones para trabajar sea izquierda o derecha [18]. La velocidad de corte representa una dificultad adicional dado que el diámetro varía constantemente de manera rápida. Para un diámetro menor la velocidad será alta y baja para un diámetro alto.

1.6. Parámetros de corte

Para cada proceso de mecanizado es importante la selección parámetros como: velocidad de corte, avance, profundidad de corte. Para determinar la cantidad de material a remover, cual cuchilla utilizar se debe conocer estos parámetros de corte. Una vez seleccionados los parámetros dependientes como puede ser la rugosidad, se puede tomar valores idóneos de parámetros de corte [19].

1.6.1. Velocidad de corte

Si el material a ser mecanizado posee una velocidad de corte conocida sea esta 15 metros por minuto, se expresa como: la velocidad a la cual debe girar el husillo del torno para que 15 metros de la circunferencia del material mecanizado pasen por el filo de la herramienta de corte en un minuto [16].

$$V_c = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{1000} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{min}} \right] \quad [1]$$

Donde:

V_c : velocidad de corte

D : Diámetro

n : número de revoluciones

En la Tabla 9 se indican la velocidad de corte establecidas a diferentes materiales en función de los avances de mecanizado.

Tabla 9. Velocidades de corte con útiles de acero rápido [20]

Material a torneear	Resistencia a la dureza		Avance mm/vuelta					
			0,2	0,4	0,7	0,8	1,6	3,2
			Velocidad de corte m/min					
Cobre	60-80		56	53	42	38	5	21
Latón	80-120	HB	125	85	63	56	21	27
Bronce	100		63	48	42	40	27	24
Aleaciones blandas de aluminio	20	HB HB HB	132	85	63	56	24	28
Aleaciones duras de aluminio	25		118	75	56	50	28	28
Aleaciones de magnesio	20	HB	1000	900	825	800	28	700
Plásticos			60-200					
Goma dura			100					

Nota: Las velocidades de corte indicadas en la Tabla 9 aplican para profundidades de corte menor a 5 mm; para profundidades mayores a 5 mm se debe reducir de un 10 a 20%. Estos valores son aplicados para operaciones de acabado, para otras el avance cambia, como se muestra a en la Tabla 10 [20]:

Tabla 10. Avances para operaciones de torneado [20]

Operación	Avance
Desbastado	0,7
Tronzado	0,6

1.6.2. Avance de herramienta

El avance en el torno se puede analizar como la distancia que ha recorrido el útil de corte durante el mecanizado por cada revolución del usillo [21]. Se lo puede controlar manualmente sea para cualquiera de las operaciones por medio del volante de cada carro del torno. El avance cambia de acuerdo al tipo de acabado para desbaste utiliza avances rápidos y el acabado avances más lentos.

1.6.3. Profundidad de mecanizado

La profundidad de corte se define como el espesor del material arrancado por el útil de corte [21]. La profundidad de pasada está en función de la dureza del material a mecanizar, del acabado a obtener dado que para desbaste la profundidad es mayor y en acabado la profundidad es muy baja. Este parámetro depende de la potencia del torno dado que con una potencia superior se puede dar pasadas de hasta de 10 mm de profundidad.

1.6.4. Número de revoluciones

En número de revoluciones está directamente relacionado al material a mecanizar, el diámetro del mismo, el tipo de operación. Durante la pasada de acabado se debe asegurar la integridad de la herramienta caso contrario se deberá reducir la velocidad [22].

El número de revoluciones es determinado a partir de la ecuación de velocidad de corte y con los datos del material de referencia, expuestos a continuación:

1.6.5. Distribución de carga en corte de metales.

En operaciones de arranque de viruta como es el torneado se pueden diferenciar dos fuerzas que son las producidas por la herramienta al penetrar el material y separar viruta del material. Dichas fuerza son perpendiculares entre sí: fuerza de fricción y fuerza normal a la ficción [4].

La fuerza de fricción F , es producida sobre la cara de desprendimiento de la herramienta por el flujo de la viruta al desprender material. La fuerza normal a la fricción N , es perpendicular a la fuerza de fricción. Dichas fuerzas están representadas en la Figura 1.

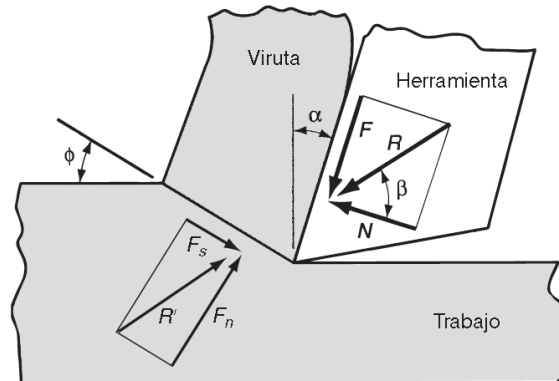


Figura 1. Distribución de fuerzas en arranque de viruta de metales [11].

1.7. Herramienta de trabajo

La herramienta más común para procesos de mecanizado es acero rápido (HSS), es utilizada para alcances simples, para herramientas donde su diseño es complejo además que las velocidades de trabajo no son altas. Para otro tipo de exigencias se puede utilizar carburos y cerámicos donde se debe trabajar a altas velocidades de corte, en estos casos los insertos vienen en distintos grados y geometrías para cada aplicación. Una correcta selección de herramienta de corte proporciona un servicio confiable, funcional y económico [19].

1.7.1. Cuchilla de acero rápido HSS

Aceros de alta velocidad (High Speed Steel), son aceros diseñados exclusivamente para herramientas de corte altamente aleados, capaces de mantener su dureza constante a pesar de las elevadas temperaturas a la que es sometida. Se puede dividir los aceros de alta velocidad en dos tipos:

1.7.2. Clasificación:

- **Los HSS tipo tungsteno:** en su composición destaca el tungsteno (W) como su principal elemento de aleación. Los elementos complementarios son el cromo (Cr) y el vanadio (V). Uno de los HSS originales y mejor conocidos es el grado T1 o acero de alta velocidad 18-4-1, el cual contiene 18% de W, 4% de Cr y 1% de V.

- **Los grados HSS molibdeno:** Posee combinaciones de tungsteno (W) y molibdeno (Mo), más los mismos elementos de aleación adicionales que el tipo Tungsteno. El cobalto (Co) es agregado con el fin de mejorar su dureza en caliente [4].

En la Tabla 11 se expone de manera detallada la composición química de la cuchilla utilizada la cual es una aleación de cromo-molibdeno-vanadio.

Tabla 11. Contenido y funciones de elementos aleados en HSS [23]

Composición Química (%)					
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,39	1	0,4	5,3	1,3	0,9

1.7.3. Herramienta seleccionada

La cuchilla utilizada es tipo cuadrada donde sus dimensiones son: 3/8" x 3"

Características:

- Buena resistencia ala abrasión
- Alta tenacidad y ductilidad
- Buena resistencia a la fatiga
- Dureza de 185 HB.
-

La cuchilla de acero de alta velocidad (HSS) fue escogida en este estudio debido a la facilidad de ser afilada cuando se presenta desgaste además debido a su geometría se puede utilizar el otro extremo para otro tipo de afilado, por ultimo estas son muy comercializadas en Ecuador.

1.7.4. Geométrica de las herramientas

Cada herramienta de corte posee ciertas características geométricas para cada proceso de mecanizado. Las herramientas de corte se las puede clasificar en dos tipos:

- **De punta:** utilizadas para mecanizado en torno, cepillado.
- **De múltiples filos cortantes:** brocas, fresas, escariador [13].

Principales ángulos para cuchillas de acero de alta velocidad

- **Ángulo de despullo (α)** : evita el contacto entre la superficie del material a trabajar y la herramienta. Si el ángulo es mayor, la punta se puede astillar, si es bajo el flanco de la herramienta se puede desgastar de manera excesiva [24].
- **Ángulo de ataque (γ)** : controla la dirección del flujo de la viruta, este ángulo tiene un rango definido de trabajo ubicado entre: -5° a 30° [24].
- **Ángulo de punta (ε)** : es la diferencia de los ángulos formados a cada filo menos 180° , se lo ubica en el mitad de la herramienta para lograr la punta de forma simétrica, este ángulo es generado para producir una sección de viruta favorable [24].
- **Radio de punta (r)** : está relacionado directamente con calidad superficial y la resistencia de la punta de la herramienta. Si el radio muy reducido significa que la herramienta termina en punta por lo tanto el acabado será malo, si el radio es demasiado grande la herramienta sufrirá vibraciones [24].

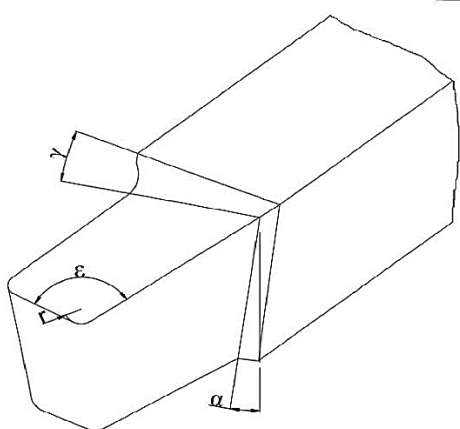


Figura 2. Principales ángulos de herramienta de torneado [14].

1.7.5. Herramientas de desbaste

Cada trabajo o proceso exige un determinado tipo de herramienta, en el caso del desbastado se prioriza la mayor cantidad de arranque de viruta en el menor tiempo posible, su principal característica es su robustez. Su geometría puede ser recta o curva.

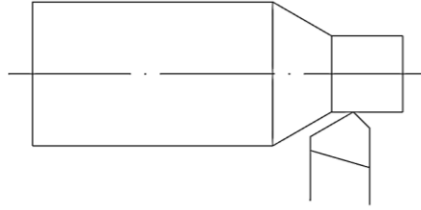


Figura 3. Cuchilla de desbaste derecha. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

1.7.6. Cilindrado

Se puede diferenciar cuchillas derechas e izquierdas. La disposición de la geometría indica donde inicia la operación de mecanizado.

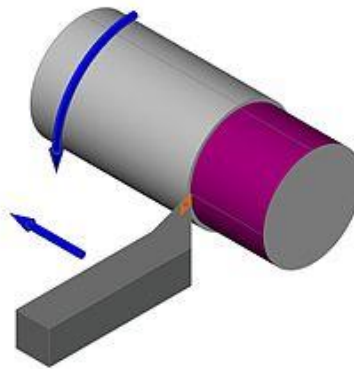


Figura 4. Representación de cilindrado. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

En la Figura 5 se muestra la forma de la cuchilla de cilindrado.

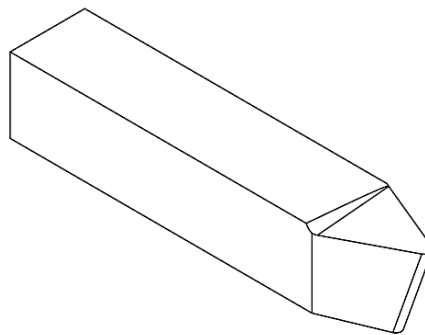


Figura 5. Cuchilla de cilindrado derecha. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

La Figura.6 muestra la disposición del ángulo de punta y del radio de una cuchilla de cilindrado.

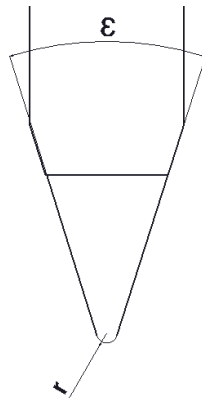


Figura.6. Vista superior de cuchilla de cilindrado. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Donde:

ε : Ángulo de punta

r : Radio de punta

La Figura 7 muestra la disposición del ángulo de ataque y del ángulo de despullo de una cuchilla de cilindrado.

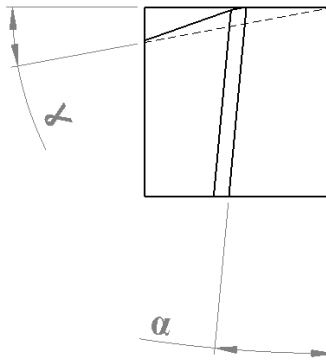


Figura 7. Vista lateral de cuchilla de cilindrado. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Donde:

γ : Ángulo de ataque.

α : Ángulo de despullo.

1.7.7. Refrentado

Como se muestra en la Figura 8 las cuchillas de refrentado se utilizan mecanizando principalmente desde dentro hacia fuera. No se recomienda mecanizar con gran profundidad debido a la poca resistencia debido a que termina en punta se puede desgastar prematuramente.

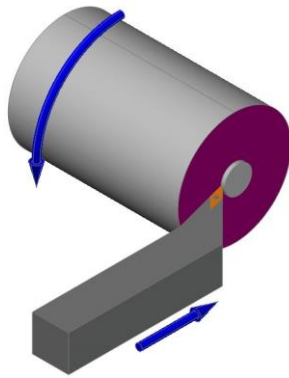


Figura 8. Representación de cuchilla de refrentado. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

En la Figura 9 se muestra la forma de la cuchilla de refrentado.

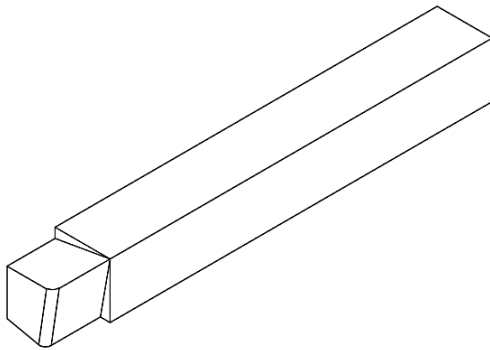


Figura 9. Cuchilla de refrentado. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

La Figura 10 muestra la disposición del ángulo de ataque y del radio de una cuchilla de refrentado.

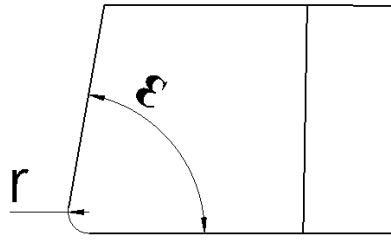


Figura 10. Vista superior de la cuchilla de cilindrado. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Donde:

ε : Ángulo de punta

r : Radio de punta

La Figura 11 muestra la disposición del ángulo de desprendimiento y el ángulo de inclinación de una cuchilla de refrentado.

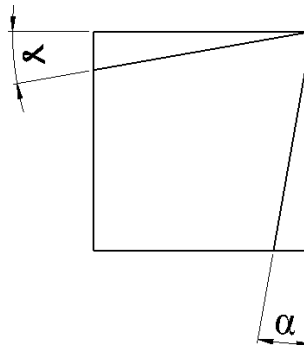


Figura 11. Vista frontal cuchilla de refrentado. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Donde:

γ : Ángulo de ataque

α : Ángulo de despullo

1.8. Afilado de cuchillas de corte

Para el afilar útiles de corte de torno se debe utilizar muelas blandas compuestas por electrocorundum o corindón artificial de granulación variada, para metales duros o insertos de tungsteno se emplea muelas blandas de carburo de silicio o de diamante. El afilado es realizado en dos fases, la primera se la desarrolla con muelas de grano grueso y el acabado se lo realiza por medio de muelas de grano fino.

De preferencia la muela de afilado debe girar atacando el filo de la herramienta dado que si no se lo hace el útil afilado tendrá rebabas o en el caso de plaquitas de metal duro soldadas se podrían desprender. El correcto afilado es comprobado por medio de una galga de afilado de útiles de torno o un goniómetro si los ángulos generados no están en la galga [14].

1.9. Máquina afiladora

Las máquinas afiladoras deben cumplir con ciertas características como:

- Robusta
- Mesas y soportes para sujetar el útil de corte de manera adecuada
- Capacidad de aproximar con precisión la herramienta de corte hacia la muela de afilado
- Capacidad de desplazamiento de la muela para no fijar el afilado en un solo punto

1.9.1. Afiladora mecánica

Son denominadas máquinas universales dado que en la mayoría de los casos no solo afilan cuchillas además otras herramientas como fresas, brocas y machuelos, la estructura es totalmente mecánica y en algunos casos electrónica, posee capacidad de acercar con precisión la herramienta a la piedra.

- Realizar movimientos repetitivos tanto horizontales y verticales
- Ubicación de ángulos adecuados para la variedad de trabajos requeridos además de la geometría de la herramienta.

- El operario debe conocer la máquina para ubicar correctamente el útil de corte y los movimientos requeridos para su afilado [25].



Figura 12. Afiladora mecánica. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Partes:

- Bancada
- Montante
- Cabezal portañueles
- Guías del montante
- Carro transversal
- Mesa
- Cabezal divisor

1.10. Acabado superficial e integridad superficial

La superficie de cierto material intervenido está asociado a dos aspectos importantes las cuales son: irregularidades en la superficie, lo segundo son las alteraciones metalúrgicas en la superficie tratada lo cual está ligado a la integridad superficial [19].

1.10.1. Textura y rugosidad de una superficial

El acabado superficial trata solo irregularidades geométricas de la superficie de sólidos además de los instrumentos de medición para rugosidad, se trata términos como: aspereza,

ondulación y defectos. Donde cada tipo de irregularidad como: irregularidades finas es producido por procesos de mecanizado, ondulaciones por efectos de vibración otros como grietas, rasguños, arañazos y crestas.

La Figura 13 representa una vista microscopica de la rugosidad de una superficie.

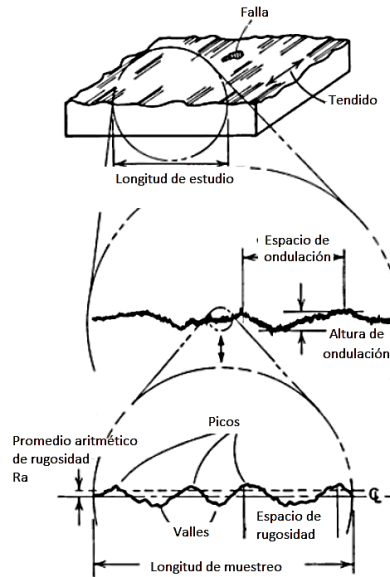


Figura 13. Representación esquemática de rugosidad superficial [19].

Rugosidad promedio R_a

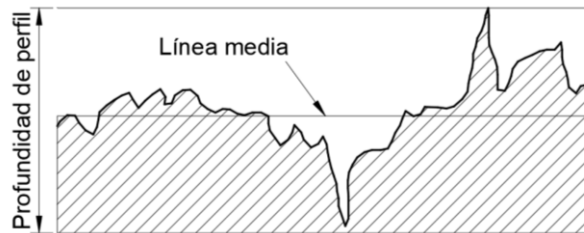


Figura 14. Rugosidad promedio [18].

$$R_a = \frac{1}{n} \int_{x=0}^{x=L} |y| dx$$

[2]

Donde

L : Longitud de estudio

y : Ordenada desde la línea central

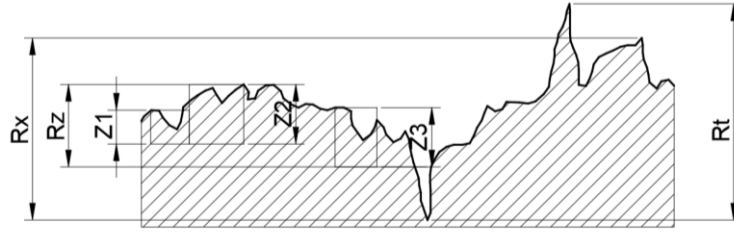


Figura 15. Parámetros de rugosidad [25].

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3}{3} \quad [3]$$

Donde

R_t : Profundidad de rugosidad máxima en μm

R_{\max} : Profundidad de rugosidad individual máxima en μm

R_z : Profundidad media de rugosidad en μm

La rugosidad se puede calcular matemáticamente por medio de la relación [26]:

$$R_a = \frac{125 \cdot f^2}{R} \quad [4]$$

Donde

R_a : Rugosidad superficial en μm

f : Avance de la herramienta en mm/rev

R : Radio de la punta de la herramienta en mm

1.10.2. Integridad de la superficie

La integridad superficial incluye parámetros como geométricos, físicos, químicos, así como también sus propiedades mecánicas y metalúrgicas, se toma en consideración la integridad de la superficie describe no solamente los rasgos topológicos (geométricos) de las superficies, sus propiedades físicas y químicas, sino también sus propiedades y características mecánicas y metalúrgicas. La integridad de la superficie es una consideración dado que toma en cuenta otros factores como la resistencia a la fatiga, corrosión y tiempo de vida útil. Los procesos de mecanizado pueden provocar defectos superficiales. Estos son el resultado de varios factores como:






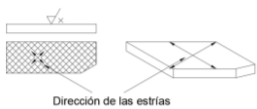
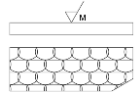
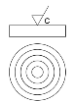

- Defectos propios de la materia prima a ser mecanizada.
- Un proceso de mecanizado ejecutado de manera errónea.
- Los parámetros del proceso no son controlados, por ejemplo: revoluciones a las cuales debe ser mecanizada la materia prima, geometría inadecuada de la herramienta entre otros [13].

1.10.3. Representación de la capa de mecanizado

Cada proceso de mecanizado tiene su propia característica desarrollado por el método empleado como es el caso de la fresadora donde se lo puede desarrollar de manera longitudinal, el torno líneas generadas en el material en revolución debido al contacto de la cuchilla.

En la Tabla 12 se indica la simbología establecida para la representación de la calidad de la capa de mecanizado.

Tabla 12. Orientación rugosidades [27]

SÍMBOLO	INTERPRETACIÓN	REPRESENTACIÓN
	Paralelas al plano de proyección de la vista sobre la cual se aplica el símbolo.	
	Perpendiculares al plano de proyección de la vista sobre el cual se aplica el símbolo	
	Cruzadas en dos direcciones oblicuas con relación al plano de proyección de la vista sobre la cual se aplica el símbolo.	
M	Multidireccional	
C	Aproximadamente circular con relación al centro de la superficie a la cual se aplica el símbolo.	
R	Aproximadamente radial con respecto al centro de la superficie a la cual se aplica el símbolo.	

1.10.4. Categorización rugosidad superficial

Las rugosidades y sus respectivas tolerancias se encuentran relacionadas a las técnicas de mecanizado más típicamente empleadas.

En la Tabla 13 se detallan los rangos de rugosidades para cada categoría y su respectiva denominación de acabado superficial N.

Tabla 13. Categorización de rugosidades [19]

Categoría	Ra	N	Proceso de mecanizado típico
Súper acabado	0 a 0,1	21	Lustrado, micro afilado, rectificado
Refinado	0,1 a 0,2	20	Lustrado, afilado, rectificado
Lustrado	0,2 a 0,4	19	Lustrado, lapeado
Liso	0,4 a 0,8	18	Lustrado, fresado
Fino	0,8 a 1,6	17	Rectificado, fresado, escariado
Semi fino	1,6 a 3,2	16	Lustrado, fresado, torneado
Regular	3,2 a 6,3	15	Conformado, fresado, torneado
Semi regular	6,3 a 12,5	14	Fresado, torneado
Áspero	12,5 a 25	13	Torneado
Rustico	25 a 50	12	Torneado

1.11. Rugosímetro

Un rugosímetro es un dispositivo que permite medir la rugosidad en superficies o perforaciones de un elemento.

1.11.1. Mitutoyo SJ 210

El rugosímetro modelo Mitutoyo SJ 210 que se muestra en la Figura 16, es un instrumento portátil, ligero y de sencillo manejo, que realiza estas funciones de manera cómoda y con precisión, además presenta una pantalla que facilita la interfaz con el operador.



Figura 16. Rugosímetro Mitutoyo SJ 210 [28].

a. Funcionamiento

El rugosímetro se coloca en posición sobre la pieza que se desea medir su rugosidad, la aguja sensor recorre automáticamente la superficie mientras a tiempo real traza el perfil. La representación gráfica y simbólica de la rugosidad superficial en la pantalla LCD se calcula mediante la detección y procesamiento del desplazamiento vertical de la aguja a lo largo del eje horizontal [28].

b. Características:

- La pantalla LCD de 2,4 pulgadas LCD ofrece una excelente lectura y una intuitiva pantalla que es fácil de usar. La pantalla LCD también incluye la retroiluminación para mejorar la visibilidad en entornos oscuros.
- El Surftest SJ-210 se puede mover fácilmente utilizando los botones en el frente de la unidad y en la cubierta.
- Las lecturas se pueden almacenar en una memoria interna.
- Una tarjeta de memoria opcional se puede utilizar como una memoria extendida para almacenar grandes cantidades de perfiles y condiciones.
- Además de resultados satisfactorios, el SurftestSJ-210 puede mostrar los resultados de seccional y los perfiles, las curvas de carga y la amplitud de distribución de curvas [28].
- Los resultados obtenidos son compatibles con varios estándares de rugosidad, como JIS (JIS-B-0601-2001, JIS-B-0601-1994, JIS-B-0601-1982), VDA, ISO-1997 Y ANSI.

c. Datos técnicos:

- Rango de medición, Eje X:
 - 0.70 "(17,5 mm)
 - 0.22 "(5.6mm) Tipo transversal
- Detector, Rango: 360 μm (-200 μm a + 160 μm)
- Método de medición: patinó
- Fuerza de medición: 4mN (0.75mN)
- Punta de aguja: Diamante, 90° / 5 μmR (60° / 2 μmR)

- Radio de curvatura de la paleta: 40 mm
- Fuerza de deslizamiento: menos de 400 mN
- Tipo: Inductancia diferencial [28].

1.11.2. Signo de mecanizado

La simbología de la Figura 17 representa la forma, la calidad y en general el conjunto de estas especificaciones indican el estado de una superficie.

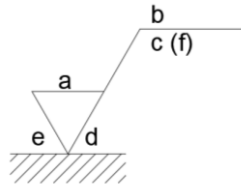


Figura 17. Especificaciones de estado [27].

Donde:

- Valor nominal de la rugosidad Ra en μm o a su vez la simbología correspondiente de N1 hasta N12.
- Proceso de mecanizado o tratamiento superficial a especificar.
- Longitud de estudio o de aplicación.
- Orientación de las estrías producidas por el proceso de mecanizado.
- Sobre medida para mecanizado.
- Otros valores de rugosidad [27].

No es indispensable completar todos los campos, se puede especificar los necesarios.

1.12. Método Taguchi

La metodología fue desarrollada por el Dr. Taguchi en el año 1960 usado de manera muy amplia en ámbitos industriales y científicos dado que no se presenta complejo desde el punto de vista matemático por la generación de modelos complejos además de poder ser optimizado. La ventaja del uso de esta metodología es el enfoque a los parámetros que afectan directamente al experimento y su influencia en el desempeño del mismo. El método está conformado por: el diseño del sistema, parámetros de diseño y la tolerancia del mismo.

El método determina la mejor combinación de parámetros involucrados en el proceso de mecanizado, utiliza un arreglo ortogonal adecuado para generar el menor número de experimentos, esto lleva a generar un conjunto de experimentos para analizar de una manera más óptima desde el punto de vista económico [29].

Los parámetros de diseño son una parte fundamental para el desarrollo del método dado que estos parámetros definirán, confirmarán y podrán predecir los resultados finales de cada experimento desarrollado.

1.12.1. Aplicación del método Taguchi

El flujograma de la

Figura 18. muestra el procedimiento necesario para realizar el método Taguchi.

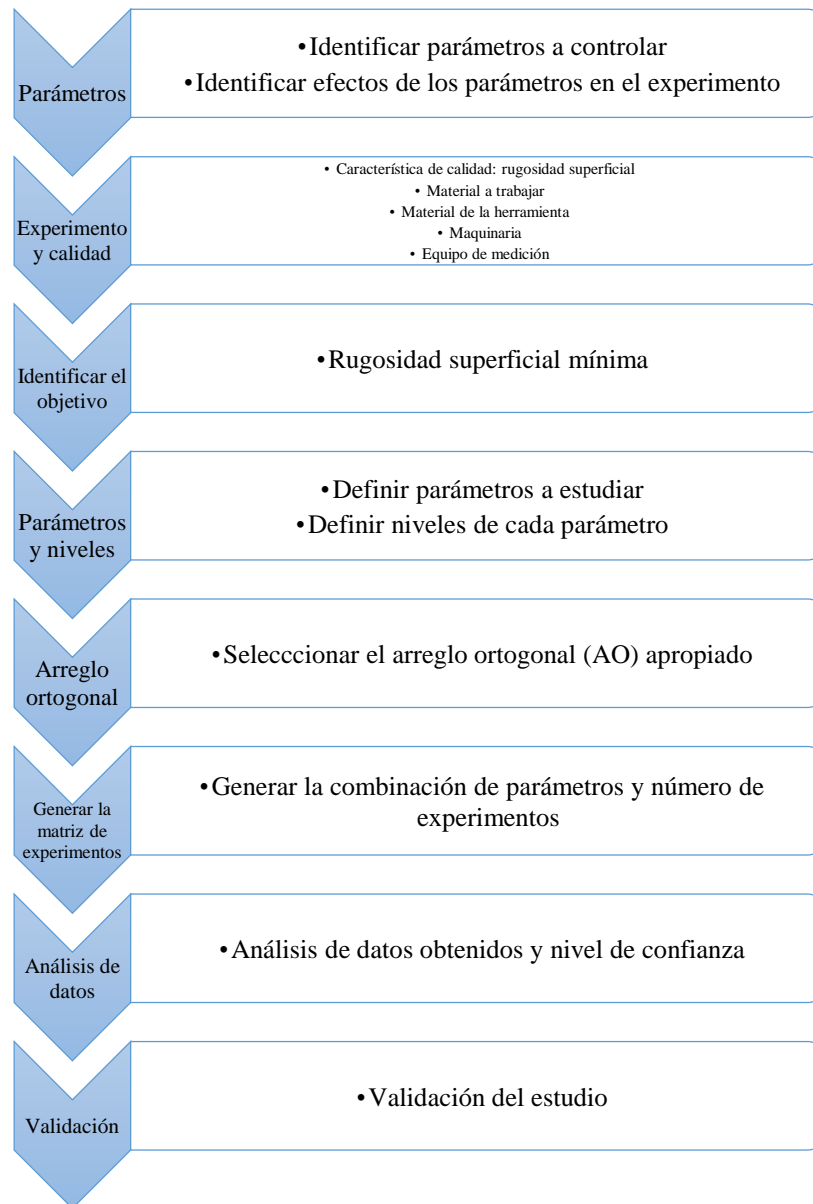


Figura 18. Proceso de aplicación método Taguchi [30].

La aplicación del método se da una vez que los parámetros de estudio han sido seleccionados, una vez realizada la selección, el siguiente paso es escoger el arreglo ortogonal (AO) apropiado para que el análisis estadístico pueda ser factible además del costo y tiempo a ser empleados.

Para escoger el AO se analiza los grados de libertad del experimento para lo cual los grados de libertad (GDL) del AO escogido deben ser mayor o igual a los GDL requeridos para el experimento [31].

Los GDL del experimento son calculados por medio de la siguiente fórmula:

$$T_{DF} = (n_1 - 1) \cdot n_f + (n_1 - 1) \cdot (n_1 - 1) \cdot n_i \quad [5]$$

Donde:

n_1 : número de niveles de los factores

n_f : número de factores

n_i : número de interacciones

1.12.2. Arreglo ortogonal

Un arreglo ortogonal considera de manera imparcial los niveles de los factores durante cada experimento que se planifica, el arreglo es seleccionado en base al número de factores y los niveles de cada uno para ser controlados durante cada experimento. Para verificar que el comportamiento del estudio no es lineal se debe escoger más de dos niveles. Si el experimento contiene tres factores los cuales afectan al estudio es necesario estudiar la interacción de cada uno en el estudio. En el caso de tres factores existirá tres interacciones: AxB, BxC y AxC; el número de interacciones depende del número de factores a estudiar [32].

Notación

$$L8(2^7) \quad [6]$$

Donde:

8 : Número de corridas o experimentos

2: Número de niveles

7: Factores a controlar [33].

La Tabla 14 indica un ejemplo de un arreglo Taguchi L8.

Tabla 14. Diseño Taguchi L8 [33]

	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

1.13. Análisis estadístico

Utilizado para analizar si los procesos desarrollados son estadísticamente significativos, se utiliza el análisis de varianza ANOVA [34].

1.13.1. Análisis de varianza ANOVA

Este análisis es un método utilizado para validación de igualdad de tres o más medias poblacionales, para llevar a cabo este análisis se requiere utilizar la distribución F de Fischer [35].

Este método verifica si los factores principales o de interacción seleccionados y los datos obtenidos son válidos desde el punto de vista estadístico. Este análisis engloba parámetros como: suma de cuadrados F-radio, P-value entre otros [36]. El intervalo de confianza va entre el 85% y 99%, de los cuales lo más común es 90% o 95% [37].

1.13.2. Términos e identificación

ANOVA realiza análisis en base a cálculos de valores conocidos apoyado en parámetros tales como: grados de libertad, sumas de los cuadrados, cuadrado medio entre otros, estos son organizados en un formato estándar tabulado.

Las cantidades mencionadas, así como las relaciones entre sí, estas se trabajan por medio de la notación de la Tabla 15.

Tabla 15. Términos involucrados análisis ANOVA [37]

Símbolo	Nombre	Símbolo	Nombre
V	Valor medio raíces (varianza)	P	Porcentaje de influencia
S	Suma de los cuadrados	T	Total (De resultados)
f	Grados de libertad	N	Número de experimentos
e	Error (Experimental)	$C.F.$	Factor de corrección
F	Prueba F	n	Grados de libertad totales

1.13.3. Varianza

La varianza de cada factor del estudio es calculada por medio de la suma de los cuadrados de cada resultado del experimento, esto se divide para los grados de libertad del factor.

$$V = \frac{S}{f} \quad [38] \quad [7]$$

1.13.4. Prueba F

Es la relación entre la varianza del parámetro y error, es utilizada para determinar si el parámetro estudiado tiene influencia en el objetivo del estudio [38].

El valor de F es determinado comparando el valor calculado con la Tabla 35 de la prueba F de Fisher estandarizada la cual está presente en el capítulo 2, donde se debe tomar en cuenta el nivel estadístico además de los factores propuestos. Si el valor calculado con datos del experimento es mayor que el valor tabulado de la prueba, se concluye que el parámetro es significativo para el estudio caso contrario es agrupado [39].

$$F = \frac{V}{e} \quad [38] \quad [8]$$

1.13.5. Porcentaje de influencia

El porcentaje de influencia de cada factor se calcula mediante la relación entre el factor y suma total de los cuadrados lo cual es expresado en porcentaje.

$$P = \left(S \cdot \frac{100\%}{S_T} \right) \quad [38] \quad [9]$$

Donde:

S_T : Suma de los cuadrados totales

$$S_T = S(\text{cada prueba}) - C.F \quad [38] \quad [10]$$

$$C.F. = \left(\frac{1}{n} \right) \cdot \left[\sum_{i=1}^n y_i \right]^2 \quad [38] \quad [11]$$

Donde:

n : número de experimentos

y : valor del resultado para cada factor y sus niveles

1.13.6. Grados de libertad

El análisis estadístico los DOF es un indicativo de la cantidad de información contenido en un grupo de datos. El número de grados de libertad para cada factor es determinado por el número de niveles menos uno [40].

$$f_{Total} = \text{Número de pruebas} - 1 \quad [38] \quad [12]$$

Para factores:

$$f_{factores} = \text{Número de niveles} - 1 \quad [38] \quad [13]$$

Para el error:

$$f_e = f_{Total} - f_{factores} \quad [38] \quad [14]$$

CAPÍTULO II

OBTENCIÓN PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y DE MECANIZADO

2.1. Obtención de Cuchilla de cilindrado

2.1.1. Elección de geometría general para cuchillas de cilindrado.

Para la elección de la geometría de la cuchilla se consideran dos alternativas, las cuales se muestran en las Figura 19 y Figura 20, de entre las cuales se optó por la cuchilla de punta simétrica debido a su versatilidad en operaciones de desbaste y acabado.

Alternativas:

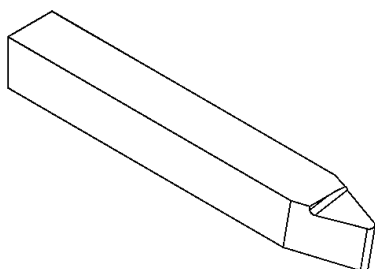


Figura 19. Cuchilla de cilindrado de punta simétrica. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

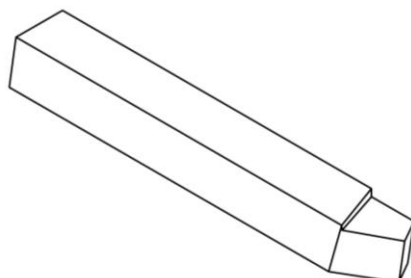


Figura 20. Cuchilla de cilindrado izquierda. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.1.2. Valores numéricos de ángulos de referencia

De acuerdo a la Tabla 16 se detallan distintos ángulos de la herramienta de cilindrado en función cada material, de esta tabla se obtienen datos referenciales del trabajo de termo fijo, los cuales son utilizados como punto de partida.

Tabla 16. Ángulos de herramienta de torneado según el material de referencia [23]

Herramienta: Acero de alta velocidad			
Material	Ángulo de despullo	Ángulo de ataque	Ángulo de punta
	α	β	ε
Termo fijo	20-30	15-20	20

2.1.3. Propuesta de ángulos para cuchillas para cilindrado.

Para la determinación de los ángulos aproximados de la cuchilla de cilindrado, se considera ángulos variables para la geometría general de acuerdo al modelo seleccionado. Dichos ángulos se detallan en la Tabla 17.

Tabla 17. Ángulos de referencia cuchilla cilindrado

Ángulo de punta	Ángulo de ataque	Ángulo de despullo	Radio de punta
ε	γ	α	$r(mm)$
30	10	8	0,3
35	10	5	0,4
40	8	13	0,5
45	5	11	0,6
60	10	10	0,7

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Para poder diferenciar una cuchilla de otra se las ha identificado por medio de su ángulo de punta, el cual es su característica más distintiva.

2.1.4. Definición de parámetros de mecanizado de referencia

Los parámetros de mecanizado de velocidad de corte y avance, se encuentran tabulados en función de cada material en la Tabla 9 del Capítulo I.

Para el presente estudio se concluyó como material de referencia a las aleaciones blandas de aluminio, para los cuales corresponde los valores señalados en Tabla 18.

Tabla 18. Parámetros de mecanizado del material de referencia [19]

Material de referencia	Resistencia a la dureza	Avance mm/vuelta					
		0,2	0,4	0,7	0,8	1,6	3,2
		Velocidad de corte m/min					
Aleaciones blandas de aluminio	20 HB	132	85	63	56	24	28

2.1.5. Profundidad de pasada A_p

Para establecer la profundidad de pasada (A_p), se ha considerado que cuando el radio de la cuchilla es mayor a la profundidad de mecanizado, se provoca fricción por rozamiento sobre la pieza, lo cual produce incremento de temperatura, esfuerzos innecesarios y como consecuencia un acabado superficial deficiente con huellas. Por esta razón, la profundidad de mecanizado debe ser mayor al radio de la punta de la cuchilla corte [13].

Por lo tanto, se considera lo siguiente:

$$A_p > \text{Radio de la herramienta}$$

Se recomienda que la profundidad de pasada A_p tenga una magnitud dentro del intervalo de 6 y 10 veces el valor del avance (A_v), es decir:

$$6A_v < A_p < 10A_v \quad [15]$$

A_p : Profundidad de pasada (mm)

A_v : Avance (mm/rev)

Considerando lo anterior y teniendo en cuenta los avances 0.2 mm/rev y 0.4 mm/rev se ha realizado el siguiente análisis.

$$A_{p1} = 6 \cdot A_{v1} = 6 \cdot 0,2 = 1,2 \text{ mm}$$

$$Ap_2 = 10 \cdot Av_1 = 10 \cdot 0,2 = 2 \text{ mm}$$

$$Ap_3 = 6 \cdot Av_2 = 6 \cdot 0,4 = 2,4 \text{ mm}$$

$$Ap_4 = 10 \cdot Av_2 = 10 \cdot 0,4 = 4 \text{ mm}$$

En base a lo establecido, se ha considerado a 2 mm como una primera profundidad de mecanizado prudente para la operación de cilindrado en desbaste.

$$Ap = 2 \text{ mm}$$

2.1.6. Revoluciones por minuto:

El parámetro de Revoluciones por minuto se determina despejando la variable “n” desde la fórmula de velocidad de corte.

Fórmula velocidad de corte:

$$V_c = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{1000} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{min}} \right] \quad [16]$$

Fórmula revoluciones por minuto:

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{D \cdot \pi} \quad \left[\frac{\text{rev}}{\text{min}} \right] \quad [17]$$

2.1.7. Avance:

Los avances establecidos se los ha escogido de la Tabla 9, para el siguiente estudio se han considerado los siguientes avances:

- 0,2 mm/rev
- 0,4 mm/rev
- 0,7 mm/rev
- 0,8 mm/rev

Se ha descartado los avances 1,6 mm/rev y 3,2 mm/rev, ya son excesivamente rápidos, el uso de estos es contraproducente.

Con estos avances y las respectivas velocidades de corte correspondientes al del material de referencia señalada en la Tabla 9, se procede al cálculo de revoluciones por minuto.

Cálculo de revoluciones por minuto en función del avance:

Diámetro: 40 mm

Avance: 0.2 mm/rev

$$n = \frac{1000 \cdot 132 \text{ m/min}}{40 \text{ mm} \cdot 3,1416} = 1050,442 \text{ rpm}$$

Avance: 0.4 mm/rev

$$n = \frac{1000 \cdot 85 \text{ m/min}}{40 \text{ mm} \cdot 3,1416} = 676 \text{ rpm}$$

Avance: 0.7 mm/rev

$$n = \frac{1000 \cdot 85 \text{ m/min}}{40 \text{ mm} \cdot 3,1416} = 676 \text{ rpm}$$

Avance: 0.8 mm/rev

$$n = \frac{1000 \cdot 56 \text{ m/min}}{40 \text{ mm} \cdot 3,1416} = 6445,63 \text{ rpm}$$

2.1.8. Experimento

- Diseño del experimento

Para diseñar el experimento se selecciona una herramienta referencial con la que se desarrollen las siguientes etapas relacionadas a las operaciones de cilindrado; se construye el siguiente arreglo de ensayos de aproximación para dicha cuchilla, en función a los parámetros y sus respectivos niveles de mecanizado calculados.

En la Tabla 19, se muestra la definición de parámetros y niveles:

Tabla 19. Resumen de parámetros y niveles experimentales de la primera etapa

	Parámetro 1	Parámetro 2	Parámetro 3
Nivel N°	Cuchilla	Avance	rpm
1	30°	0,2 mm/rev	1050 rpm
2	35°	0,4 mm/rev	676 rpm
3	40°	0,7 mm/rev	501 rpm
4	45°	0,8 mm/rev	445 rpm
5	60°	-----	----

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Con estos valores se realiza de forma ordenada todas las combinaciones posibles entre los niveles de cada parámetro determinado, con este método se obtiene las combinaciones indicadas en la Tabla 20.

Tabla 20. Arreglo Experimental para primera etapa

Ensayo Nº	Ángulo de punta	Avance	rpm	Ensayo Nº	Ángulo de punta	Avance	RPM
1	30	0,2	1050	41	40	0,7	1050
2	30	0,2	676	42	40	0,7	676
3	30	0,2	501	43	40	0,7	501
4	30	0,2	445	44	40	0,7	445
5	30	0,4	1050	45	40	0,8	1050
6	30	0,4	676	46	40	0,8	676
7	30	0,4	501	47	40	0,8	501
8	30	0,4	445	48	40	0,8	445
9	30	0,7	1050	49	45	0,2	1050
10	30	0,7	676	50	45	0,2	676
11	30	0,7	501	51	45	0,2	501
12	30	0,7	445	52	45	0,2	445
13	30	0,8	1050	53	45	0,4	1050
14	30	0,8	676	54	45	0,4	676
15	30	0,8	501	55	45	0,4	501
16	30	0,8	445	56	45	0,4	445
17	35	0,2	1050	57	45	0,7	1050
18	35	0,2	676	58	45	0,7	676
19	35	0,2	501	59	45	0,7	501
20	35	0,2	445	60	45	0,7	445
21	35	0,4	1050	61	45	0,8	1050
22	35	0,4	676	62	45	0,8	676
23	35	0,4	501	63	45	0,8	501
24	35	0,4	445	64	45	0,8	445
25	35	0,7	1050	65	60	0,2	1050
26	35	0,7	676	66	60	0,2	676
27	35	0,7	501	67	60	0,2	501
28	35	0,7	445	68	60	0,2	445
29	35	0,8	1050	69	60	0,4	1050
30	35	0,8	676	70	60	0,4	676
31	35	0,8	501	71	60	0,4	501
32	35	0,8	445	72	60	0,4	445
33	40	0,2	1050	73	60	0,7	1050
34	40	0,2	676	74	60	0,7	676
35	40	0,2	501	75	60	0,7	501
36	40	0,2	445	76	60	0,7	445
37	40	0,4	1050	77	60	0,8	1050
38	40	0,4	676	78	60	0,8	676
39	40	0,4	501	79	60	0,8	501
40	40	0,4	445	80	60	0,8	445

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.1.9. Mecanizado de probetas

Los valores determinados de cada parámetro de corte deben ser reflejados por la máquina herramienta, sin embargo, dado que dichos valores son muy precisos y en la mayoría de los casos el torno no dispone de estos, se opta en lo posible por seleccionar los valores más cercanos que presente la máquina, como se puede apreciar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 21. Parámetros de corte calculados y disponibles en torno Emcomat 17D

Valores de parámetros de mecanizado			
Avance		Revoluciones por minuto	
Calculados	Disponibles	Calculados	Disponibles
0,2	0,196	1050	1050
0,4	0,393	676	680
0,7	0,675	501	500
0,8	0,787	445	450

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Para garantizar que el experimento sea lo más homogéneo posible a lo largo de cada etapa, todos los ensayos sobre las probetas se realizan estrictamente en la máquina herramienta torno Emcomat 17D.

2.1.10. Medición de rugosidades.

Las mediciones se efectuaron mediante el rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-210. A lo largo de tres puntos equidistantes ubicados en el perímetro de la superficie mecanizada, dichos puntos están representados con color rojo en la Figura 21.

Los datos obtenidos son R_a .

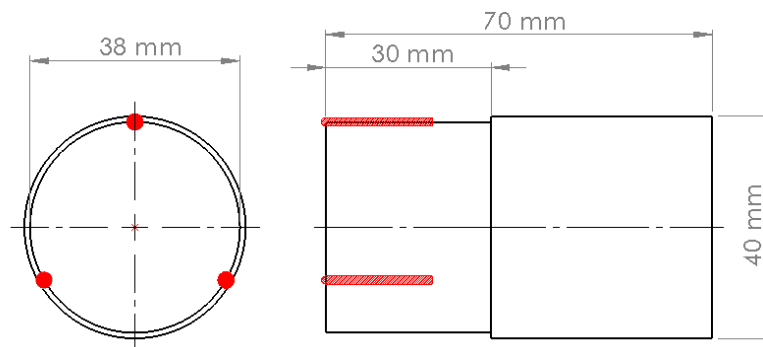


Figura 21. Puntos de medición en probetas. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

En la Figura 22 se representa la forma en la que se llevará a cabo la medición de las rugosidades en las probetas mecanizadas.

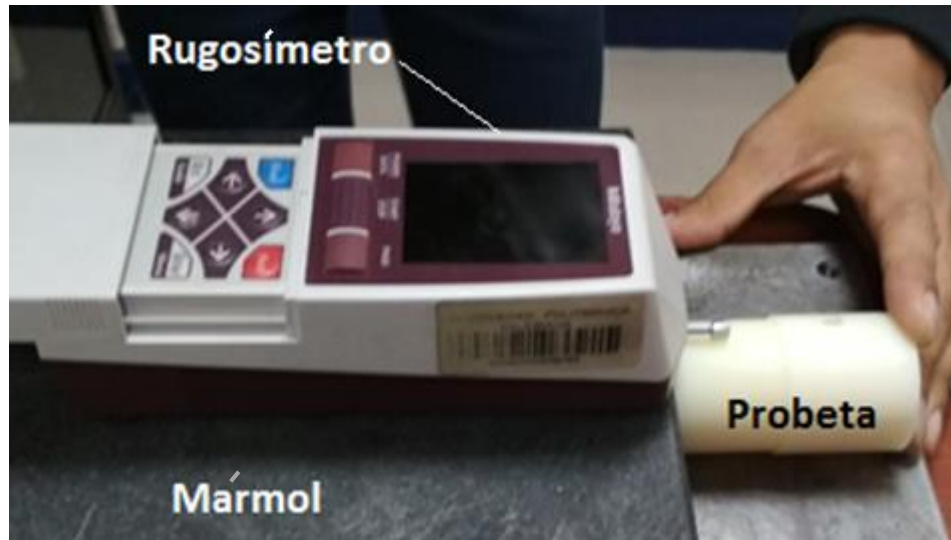


Figura 22. Medición de rugosidades. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.1.11. Análisis de resultados.

Los parámetros de mecanizado de entrada de la máquina y los datos de entrada de los ángulos de cuchilla serán evaluados en conjunto con los resultados obtenidos del proceso de medición de rugosidad mediante el análisis estadístico Anova.

2.1.12. Resultados de ensayos.

En la Tabla 22 y la Tabla 23 se detallan las rugosidades promedio Ra obtenidas al mecanizar los diferentes ensayos con sus respectivos parámetros de corte.

Tabla 22. Rugosidades de ensayos primera parte

Ensayo N°	Ángulo de punta	Avance	RPM	Ra
1	30	0,2	1050	6,010
2	30	0,2	676	5,667
3	30	0,2	501	13,275
4	30	0,2	445	12,313
5	30	0,4	1050	8,614
6	30	0,4	676	9,933
7	30	0,4	501	10,374
8	30	0,4	445	9,096
9	30	0,7	1050	18,074
10	30	0,7	676	22,133
11	30	0,7	501	25,167
12	30	0,7	445	23,239
13	30	0,8	1050	21,127
14	30	0,8	676	23,993
15	30	0,8	501	22,063
16	30	0,8	445	Fuera de rango
17	35	0,2	1050	3,502
18	35	0,2	676	5,586
19	35	0,2	501	2,694
20	35	0,2	445	2,396
21	35	0,4	1050	13,612
22	35	0,4	676	13,266
23	35	0,4	501	20,429
24	35	0,4	445	18,203
25	35	0,7	1050	29,299
26	35	0,7	676	27,430
27	35	0,7	501	23,980
28	35	0,7	445	29,104
29	35	0,8	1050	25,967
30	35	0,8	676	27,257
31	35	0,8	501	30,339
32	35	0,8	445	Fuera de rango
33	40	0,2	1050	2,448
34	40	0,2	676	3,736
35	40	0,2	501	4,911
36	40	0,2	445	5,882
37	40	0,4	1050	11,234
38	40	0,4	676	Fuera de rango
39	40	0,4	501	14,200
40	40	0,4	445	12,356

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Tabla 23. Rugosidades de ensayos continuación

Ensayo Nº	Ángulo de punta	Avance	RPM	Ra
41	40	0,7	1050	23,072
42	40	0,7	676	Fuera de rango
43	40	0,7	501	28,461
44	40	0,7	445	48,320
45	40	0,8	1050	Fuera de rango
46	40	0,8	676	Fuera de rango
47	40	0,8	501	33,612
48	40	0,8	445	Fuera de rango
49	45	0,2	1050	1,764
50	45	0,2	676	2,057
51	45	0,2	501	2,149
52	45	0,2	445	2,619
53	45	0,4	1050	12,150
54	45	0,4	676	10,820
55	45	0,4	501	13,209
56	45	0,4	445	10,486
57	45	0,7	1050	22,036
58	45	0,7	676	22,767
59	45	0,7	501	24,652
60	45	0,7	445	23,526
61	45	0,8	1050	28,046
62	45	0,8	676	19,650
63	45	0,8	501	14,836
64	45	0,8	445	17,725
65	60	0,2	1050	2,108
66	60	0,2	676	2,057
67	60	0,2	501	2,042
68	60	0,2	445	2,167
69	60	0,4	1050	8,623
70	60	0,4	676	6,146
71	60	0,4	501	8,328
72	60	0,4	445	5,448
73	60	0,7	1050	16,295
74	60	0,7	676	14,429
75	60	0,7	501	15,080
76	60	0,7	445	13,143
77	60	0,8	1050	28,319
78	60	0,8	676	26,549
79	60	0,8	501	25,430
80	60	0,8	445	26,322

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.1.13. Resultados de Rugosidad vs rpm

En las siguientes figuras se resumen los resultados de los experimentos, con el fin de apreciar de manera visual el comportamiento de las cuchillas de cilindrado en función de los parámetros de mecanizado establecidos.

En la Figura 23, se indican los valores obtenidos de rugosidad con la cuchilla de cilindrado de ángulo de punta 30°.

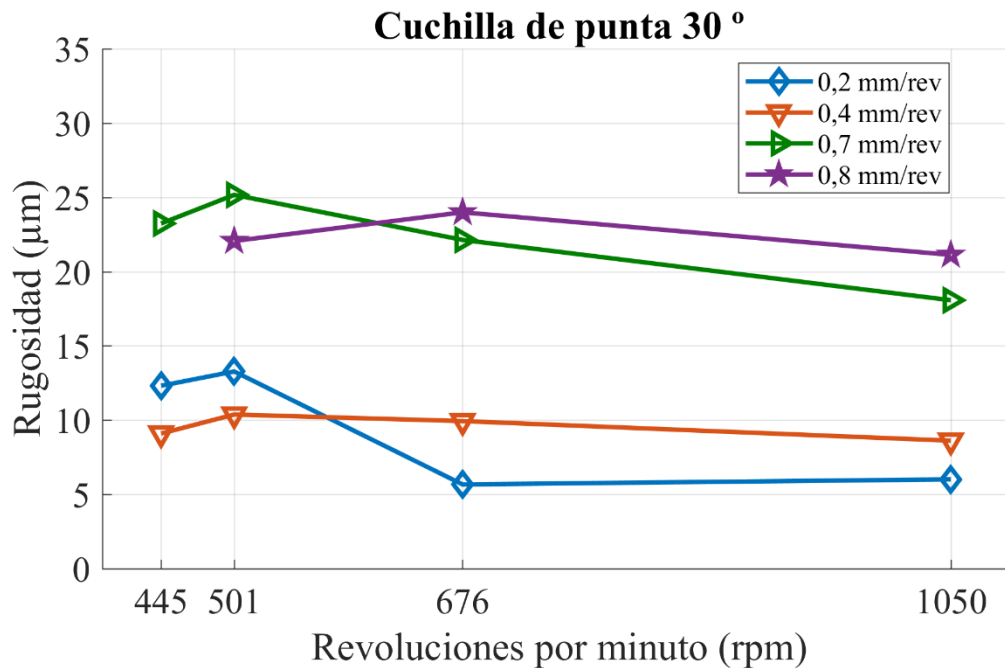


Figura 23. Rugosidades obtenidas con cuchilla de cilindrado de punta 30°. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Como se puede apreciar para la cuchilla de 30° el valor de menor rugosidad es 5,667 μm con un avance de 0,2 mm/rev y 676 rpm.
- En el caso del avance 0,8 mm/rev, no se traza la rugosidad a 445 rpm, por la razón que su rugosidad se encuentra fuera de rango, es decir es demasiado grande y no se ha podido medir por el rugosímetro.

En la Figura 24, se indican los valores obtenidos de rugosidad con la cuchilla de cilindrado de ángulo de punta 35°.

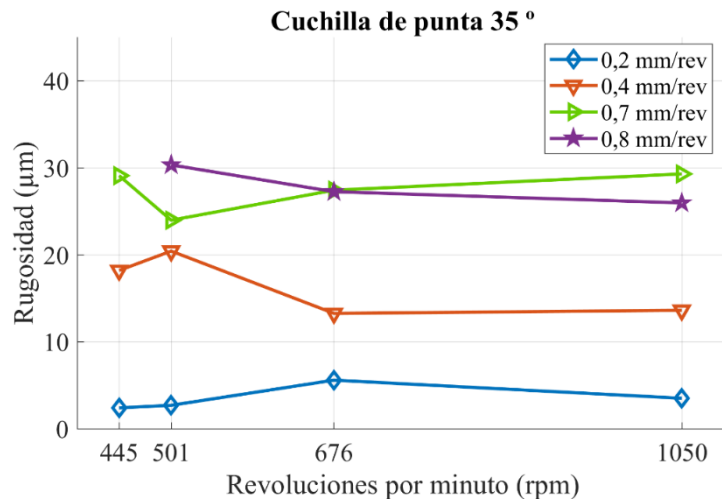


Figura 24. Rugosidades obtenidas con cuchilla de cilindrado de punta 35°. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Para la cuchilla de 35° el valor de menor rugosidad es 2,396 μm con un avance de 0,2 mm/rev y 445 rpm.

En la Figura 25, se indican los valores obtenidos de rugosidad con la cuchilla de cilindrado de ángulo de punta 40°.

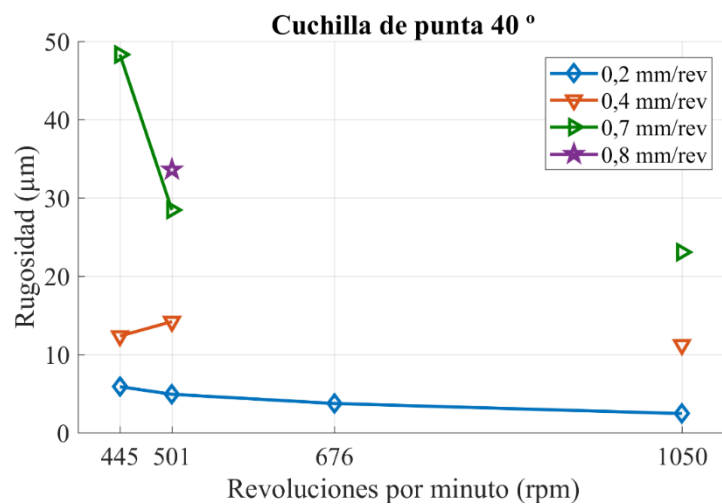


Figura 25. Rugosidades obtenidas con cuchilla de cilindrado de punta 40°. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Para la cuchilla de 40° el valor de menor rugosidad es 2,448 μm con un avance de 0.2 mm/rev y 1050 rpm.

En la Figura 26, se indican los valores obtenidos de rugosidad con la cuchilla de cilindrado de ángulo de punta 45°.

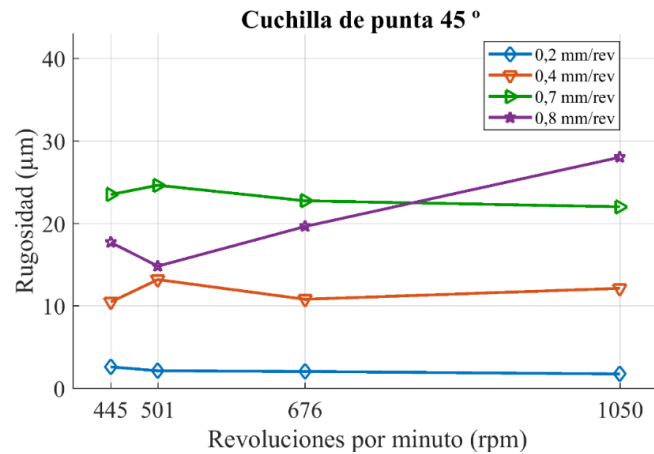


Figura 26. Rugosidades obtenidas con cuchilla de cilindrado de punta 45°. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Para la cuchilla de 45° el valor de menor rugosidad es 1,764 μm con un avance de 0,2 mm/rev y 1050 rpm.

En la Figura 27, se indican los valores obtenidos de rugosidad con la cuchilla de cilindrado de ángulo de punta 60°.

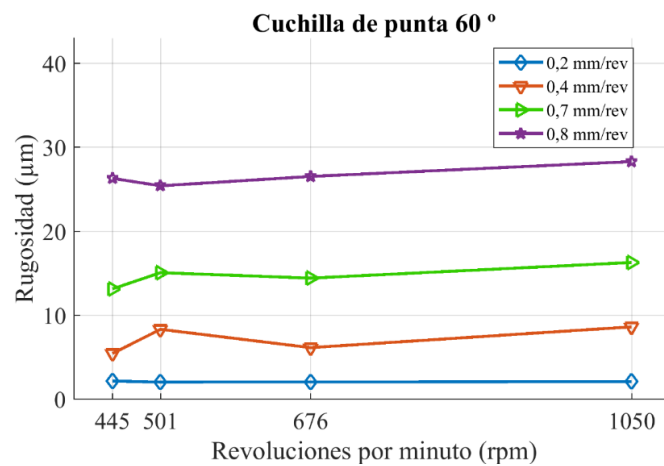


Figura 27. Rugosidades obtenidas con cuchilla de cilindrado de punta 60°. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Para la cuchilla de 60° el valor de menor rugosidad es 2,042 μm con un avance de 0,2 mm/rev y 501 rpm.
- Entre todas las herramientas ensayadas la que produce la mejor rugosidad es la cuchilla de 45° con un valor de 1,764 μm .

2.1.14. Resultados de aproximación cuchilla de cilindrado

En la Tabla 24 se resume toda la información de parámetros geométricos relacionada a las mejores cuchillas de acuerdo al estado de la viruta.

Tabla 24. Resultados aproximación cuchilla cilindrado

Parámetros			Estado de la viruta								
			Enredado en la cuchilla			Enredado en el material			Sin enredarse		
Ángulo	Unidad	Símbolo	Cuchilla 1	Cuchilla 2	Cuchilla 3	Cuchilla 1	Cuchilla 2	Cuchilla 3	Cuchilla 1	Cuchilla 2	Cuchilla 3
Rugosidad	μm	Ra	3,736	5,667	22,036	2,042	2,448	2,396	1,764	2,057	2,108
Ángulo de punta	°	ϵ	40	30	45	60	35	40	45	45	60
Ángulo de despullo	°	α	13	8	11	10	5	13	11	11	10
Ángulo de ataque	°	γ	8	10	5	10	10	8	5	5	10
Radio de punta	mm	r	0,5	0,3	0,6	0,7	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7
Avance	mm/rev	Av	0,2	0,2	0,7	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Revoluciones	rev/min	Rpm	676	676	1050	501	445	1050	1050	676	1050

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.1.15. Resultados obtenidos.

En la Tabla 24, se ha podido resumir para un fácil análisis los resultados y escogido los parámetros geométricos y de mecanizado que tienen mayor presencia al conseguir las menores rugosidades, de la misma manera esta tabla sirve para determinar un sentido en la tendencia de los parámetros, para en las siguientes etapas evitar factores que no aporten a una buena calidad de mecanizado.

- **Geometría:**

En la Tabla 25, se detallan los parámetros geométricos seleccionados a partir de la Tabla 24, dichos parámetros servirán como puntos de partida para la optimización de la geometría de la herramienta.

Tabla 25. Parámetros geométricos iniciales para cuchilla de cilindrado

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Ángulo de punta	ε	45 °
Ángulo de despullo	α	10 °
Ángulo de ataque	γ	5 °
Radio de punta	r	0,7 <i>mm</i>

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- **Parámetros de mecanizado:**

En la Tabla 26, se detallan los parámetros de mecanizado seleccionados a partir de la Tabla 24, dichos parámetros servirán como puntos de partida, alrededor de los cuales se establecerán nuevos niveles para la optimización de los factores de mecanizado.

Tabla 26. Parámetros de mecanizado iniciales

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Avance	A_v	0,2 $\frac{mm}{rev}$
Revoluciones	rpm	1050 <i>rpm</i>
Profundidad	A_p	2 <i>mm</i>

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.1.16. Herramienta seleccionada

De acuerdo al comportamiento de cada herramienta expuesto en los gráficos anteriores se puede apreciar que la cuchilla con mejores prestaciones en cuanto a rugosidad y condición de viruta es la cuchilla de punta 45° la cual se detalla en la Tabla 25, dado que con esta herramienta se consigue una operación limpia en la que la viruta es expulsada de manera uniforme sin provocar que se enrede, además que su rugosidad de 1.764 μm es la mejor de entre los ensayos realizados.

Por ende, la cuchilla de punta 45° es considerada la mejor del estudio de aproximación de la geometría, y sus parámetros geométricos serán empleados en la siguiente etapa como punto de partida, alrededor de los cuales se determinarán los siguientes niveles para optimizar dichos parámetros geométricos.

2.2. Optimización de la cuchilla de cilindrado

2.2.1. Aplicación de método Taguchi

La presente etapa será desarrollada con ayuda del método Taguchi y el método de análisis estadístico Anova. Para ello se debe tener en cuenta los parámetros geométricos de la herramienta que serán utilizados, con sus respectivas variables, además de sus niveles.

2.2.2. Definición de parámetros geométricos sus niveles

Una vez seleccionada la cuchilla de cilindrado se procede a optimizar cada uno de sus parámetros geométricos para lo cual se define los parámetros dependientes e independientes a estudiar. Para ello se analizó los valores de la Tabla 24.

Parámetros independientes:

- **Ángulo de punta (ε)**: como se puede apreciar la cuchilla que genera una mejor rugosidad es la de ángulo punta de 45°, mientras que las cuchillas de ángulos de 30°, 35°, 40° y 60° generan una tendencia a enredarse en el material o en la herramienta. Por esta razón se escogieron los ángulos de 45°, 50° y 55° como niveles del parámetro ángulo de punta, dado que con estos últimos dos valores no se ha experimentado.
- **Ángulo de despullo (α)**: se observa que en las cuchillas en las cuales la viruta tiende a enredarse tienen en su mayoría ángulos de 11° y 13°, por lo tanto, se ha escogido como niveles a los siguientes ángulos: 6°, 8° y 10°.
- **Ángulo de ataque (γ)**: en los ensayos realizados donde se obtuvo mejor acabado superficial y condición donde de la viruta no se enreda, se notó que los ángulos de desprendimiento están alrededor de 5°, por lo que se optó por definir un nivel inferior y uno superior, 3° y 8° respectivamente.
- **Radio de punta (r)**: la tendencia para una mejor rugosidad superficial apunta a las cuchillas cuyo radio de punta tienen 0,6 y 0,7 mm, por esta razón se determinó como radio a 0,8 mm para el nivel superior de este parámetro.

Parámetro dependiente:

- Rugosidad superficial (Ra)

En la Tabla 27 se detallan los parámetros geométricos con los respectivos niveles definidos.

Tabla 27. Parámetros geométricos y niveles

Parámetros		Niveles		
		1	2	3
Ángulo de punta	ε	45 °	50 °	55 °
Ángulo de despullo	α	6 °	8 °	10 °
Ángulo de ataque	γ	3 °	5 °	8 °
Radio de punta	r	0,6 mm	0,7 mm	0,8 mm

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.2.3. Selección y diseño de arreglo ortogonal

Para el presente experimento de 4 parámetros y 3 niveles respectivamente.

Para calcular el número de combinaciones o ensayos posibles se recurre al siguiente análisis de cuatro parámetros y tres niveles:

$$3^4 = 81 \text{ ensayos totales}$$

- Grados de libertad del experimento

Los grados de libertad del experimento son necesarios para seleccionar un arreglo ortogonal que pueda satisfacer el número de interacciones entre los parámetros geométricos establecidos.

$$\text{Grado de libertad: } T_{DF} = (3-1) \cdot 4 + (3-1) \cdot (3-1) \cdot 3 = 20$$

En consecuencia, el arreglo ortogonal adecuado para este experimento debe ser mayor al grado de libertad $DF = 20$, de entre las opciones se presenta L27, el cual cumple con el número de factores y de niveles necesarios.

Para aplicar las condiciones mencionadas se ha usado el software Minitab, el cual luego de ser configurado produce el arreglo ortogonal de 27 ensayos, el cual se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28. Arreglo ortogonal L27

Ensayo N°	Ángulo de punta	Ángulo de despullo	Ángulo de ataque	Radio de punta
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	2
5	1	2	2	3
6	1	2	3	1
7	1	3	1	3
8	1	3	2	1
9	1	3	3	2
10	2	1	1	1
11	2	1	2	2
12	2	1	3	3
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2
19	3	1	1	1
20	3	1	2	2
21	3	1	3	3
22	3	2	1	2
23	3	2	2	3
24	3	2	3	1
25	3	3	1	3
26	3	3	2	1
27	3	3	3	2

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- **Parámetros de mecanizado:**

En esta etapa del estudio está enfocada en la optimización de la geometría de la herramienta entonces se fijan los parámetros de mecanizado como velocidad de corte, avance y profundidad de corte, estos fueron definidos en la Tabla 26.

El avance utilizado es $0,196\text{ mm/rev}$ debido a que el torno no posee $0,2\text{ mm/rev}$.

2.2.4. Resultados del experimento

En la Tabla 29 se detallan los resultados obtenidos de rugosidad Ra correspondiente a cada ensayo.

Tabla 29. Datos y resultados obtenidos de parámetros de mecanizado

Ensayo N°	Ángulo de punta	Ángulo de despullo	Ángulo de ataque	Radio de punta	R1	R2	R3	Ra (μm)
1	45 °	6 °	3 °	0,6 mm	1,915	2,094	1,929	1,979
2	45 °	6 °	5 °	0,7 mm	1,053	1,191	1,115	1,12
3	45 °	6 °	8 °	0,8 mm	1,980	1,887	1,795	1,887
4	45 °	8 °	3 °	0,7 mm	1,323	1,412	1,497	1,411
5	45 °	8 °	5 °	0,8 mm	2,774	3,066	2,751	2,864
6	45 °	8 °	8 °	0,6 mm	3,341	3,331	3,448	3,373
7	45 °	10 °	3 °	0,8 mm	1,900	1,878	1,948	1,909
8	45 °	10 °	5 °	0,6 mm	1,056	1,228	1,07	1,118
9	45 °	10 °	8 °	0,7 mm	2,353	2,400	2,243	2,332
10	50 °	6 °	3 °	0,6 mm	2,721	2,839	3,016	2,859
11	50 °	6 °	5 °	0,7 mm	0,880	0,856	0,948	0,895
12	50 °	6 °	8 °	0,8 mm	1,327	1,224	1,198	1,25
13	50 °	8 °	3 °	0,7 mm	5,004	5,087	3,869	4,653
14	50 °	8 °	5 °	0,8 mm	3,376	3,427	3,365	3,389
15	50 °	8 °	8 °	0,6 mm	1,719	1,811	1,759	1,763
16	50 °	10 °	3 °	0,8 mm	2,645	2,538	2,638	2,607
17	50 °	10 °	5 °	0,6 mm	6,979	6,945	6,949	6,958
18	50 °	10 °	8 °	0,7 mm	2,858	2,937	2,941	2,912
19	55 °	6 °	3 °	0,6 mm	3,479	3,631	3,611	3,574
20	55 °	6 °	5 °	0,7 mm	2,955	2,999	2,908	2,954
21	55 °	6 °	8 °	0,8 mm	2,744	2,311	2,553	2,536
22	55 °	8 °	3 °	0,7 mm	3,361	3,449	3,508	3,439
23	55 °	8 °	5 °	0,8 mm	6,216	6,345	5,847	6,136
24	55 °	8 °	8 °	0,6 mm	3,452	3,689	3,668	3,603
25	55 °	10 °	3 °	0,8 mm	3,094	2,933	2,95	2,992
26	55 °	10 °	5 °	0,6 mm	6,130	5,837	5,981	5,983
27	55 °	10 °	8 °	0,7 mm	2,828	2,938	2,921	2,896

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

En la Figura 28 se representa de manera visual, el comportamiento de cada una de los 27 ensayos en función de la rugosidad obtenida.

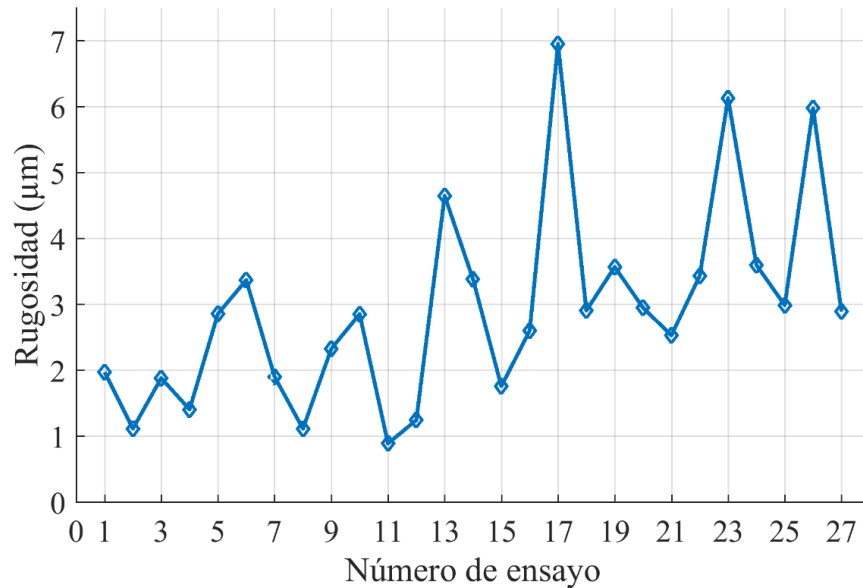


Figura 28. Número de ensayo vs Rugosidad optimización de cuchilla de cilindrado. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Como se puede apreciar la herramienta con una mejor rugosidad es correspondiente al ensayo 11 de la Tabla 29 la cual posee las siguientes características:

- Ángulo de punta: 50°
- Ángulo de despullo: 6°
- Ángulo de ataque: 5°
- Radio: 0,7 mm

En la Tabla 30 se detallan los tres mejores resultados obtenidos con cada cuchilla en función del ángulo de punta.

Tabla 30. Mejores resultados de cada ángulo de punta

Ángulo de punta	Ensayo	Ángulo de despullo	Ángulo de ataque	Radio de punta	Rugosidad μm
45 °	8	10 °	5 °	0,6 mm	1,118
	2	6 °	5 °	0,7 mm	1,120
	4	8 °	3 °	0,7 mm	1,411
50 °	11	6 °	5 °	0,7 mm	0,895
	12	6 °	10 °	0,8 mm	1,250
	15	8 °	10 °	0,6 mm	1,763
55 °	21	6 °	10 °	0,8 mm	2,536
	27	10 °	10 °	0,7 mm	2,896
	20	6 °	5 °	0,7 mm	2,954

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

En la Tabla 31 se extraen los parámetros geométricos de la cuchilla que produjo la mejor rugosidad.

Tabla 31. Cuchilla con mejor rugosidad del arreglo L27 optimización de cuchilla

Ensayo N°	Ángulo de punta	Ángulo de despullo	Ángulo de ataque	Radio de punta	Rugosidad μm
11	50 °	6 °	5 °	0,7 mm	0,895

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.2.5. Aplicación del método ANOVA

Tabla 32. Resultados de método ANOVA en parámetros geométricos cuchilla cilindrado

Parámetro	f	S	V	F	P
Ángulo de punta	2	14,55	7,27	22,98	0,23
Ángulo de despullo	2	9,20	4,60	14,53	0,14
Ángulo de ataque	2	4,55	2,27	7,18	0,06
Radio de punta	2	4,24	2,12	6,70	0,06
Error	6	3.10			0,005

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.2.6. Porcentaje de influencia

Como se muestra en la Tabla 32 el Parámetro ángulo de punta, es aquel que más influencia tiene en el proceso con 23,78 %, de la misma Tabla 35 se extrae factor F el cual será utilizado para determinar si el factor es influyente o no, esto se lo realiza mediante una hipótesis estadística.

Tabla 33. Influencia de los factores geométricos en función de la rugosidad

Parámetro	Influencia
Ángulo de punta	22,7 %
Ángulo de despullo	14,0 %
Ángulo de ataque	6,4 %
Radio de punta	5,9 %

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Hipótesis estadística:

Tabla 34. Hipótesis estadística del Parámetro A

Hipótesis parámetro A				
n1	fe	10	FA	22,98
n2	DOF	2	FFisher	19,40
FA > FFISHER				
El factor es influyente				

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

El valor F del parámetro ángulo de punta tomado de la Tabla 35 (0,05: 10: 2) es igual a 19,40 se compara con el valor de la tabla F-Fisher = 19,4 si el valor F calculado es mayor al valor F de Fisher la hipótesis es alternativa, por lo tanto el parámetro es influyente, como se muestra en la Figura 29.

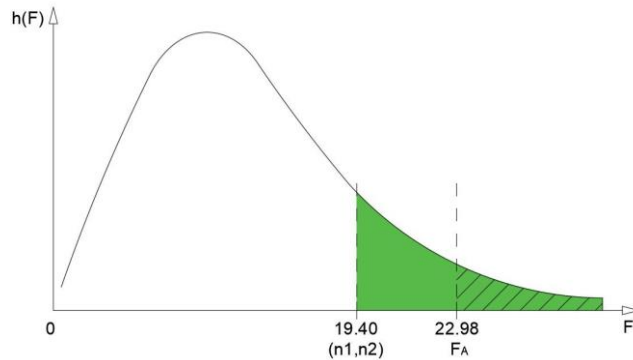


Figura 29. Prueba de hipótesis para ángulo de punta. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

El resto de parámetros fueron evaluados mediante hipótesis estadística dando como resultado nulo, lo que quiere decir que no son influyentes. Para la prueba de hipótesis se utiliza una Tabla 35 de prueba F de Fisher con nivel de confianza del 95%.

Tabla 35. Tabla de distribución normal de FISHER $F_{0,5}(f1,f2)$, 95% de confianza [41]

f1 grados de libertad del numerador; f2 grados de libertad de denominador									
f1 \ f2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	161,450	199,500	215,710	224,580	230,160	233,990	236,770	238,880	240,540
2	18,513	19,000	19,614	19,247	19,296	19,330	19,353	19,371	19,385
3	10,128	9,552	9,277	9,117	9,014	8,941	8,887	8,845	8,812
4	7,709	6,944	6,591	6,388	6,256	6,163	6,094	6,041	5,999
5	6,608	5,786	5,410	5,192	5,050	4,950	4,876	4,818	4,773
6	5,987	5,143	4,757	4,534	4,387	4,283	4,207	4,147	4,099
7	5,591	4,737	4,347	4,120	3,972	3,866	3,787	3,726	3,677
8	5,318	4,459	4,066	3,838	3,688	3,374	3,501	3,438	3,388

2.2.7. Evaluación de la media de cada nivel

Tabla 36. Evaluación de la media de cada nivel

Parámetro	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Ángulo de punta	2,00	3,03	3,79
Ángulo de despullo	2,12	3,40	3,30
Ángulo de ataque	2,82	3,49	2,51
Radio de punta	3,47	2,51	2,84

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

La Figura 30 muestra de manera gráfica el comportamiento de los efectos de las medias de cada factor evaluado.

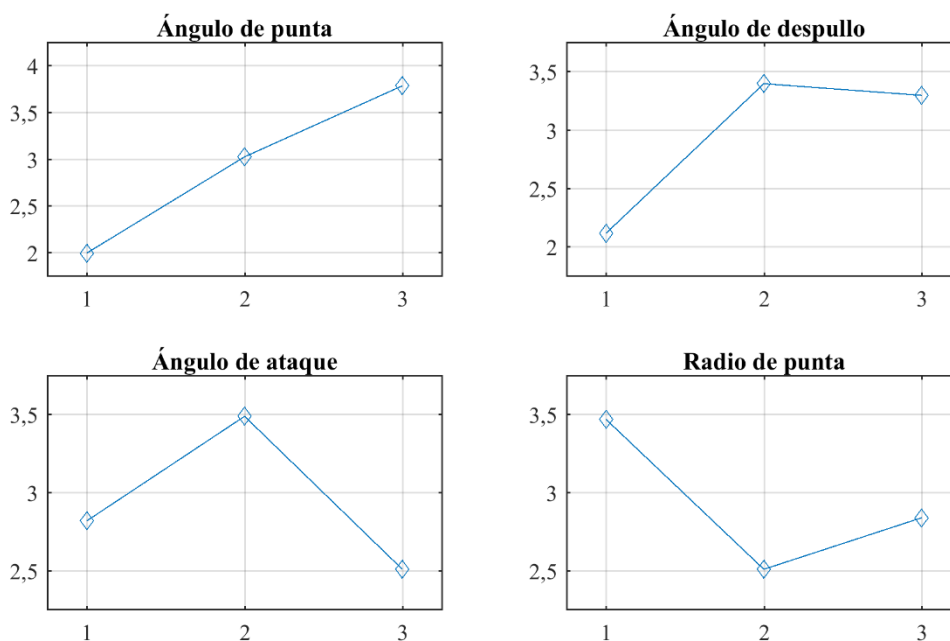


Figura 30. Efecto de la media de cada nivel cuchilla de cilindrado. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

De las gráficas mostradas se toma el menor valor de cada parámetro dado que el objetivo es obtener la menor rugosidad.

2.2.8. Parámetros óptimos

Por medio de las gráficas de respuesta de la media de cada parámetro geométrico se ha seleccionado el menor valor de rugosidad, los mismos que se muestran en la Tabla 37, los cuales según su influencia contribuye a obtener la menor rugosidad, en este caso se selecciona:

Tabla 37. Parámetros óptimos resultantes del método Taguchi

Parámetro	Nivel	Valor
Ángulo de punta	1	45 °
Ángulo de despullo	1	6 °
Ángulo de ataque	3	8 °
Radio de punta	2	0,7 mm

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.2.9. Ejemplo de cálculo del factor A

- Suma total de los resultados

$$T = \sum_{i=1}^{27} Ra_i = (1,98 + 1,12 + 1,89 + \dots + 2,99 + 5,98 + 2,90) = 79,39$$

- Factor de corrección

$$C.F = \frac{T^2}{n} = \frac{79,39^2}{27} = 233,4$$

- Suma total de los cuadrados

$$S_T = \sum_{i=1}^{27} y_i^2 - C.F. = (3,92 + 1,25 + 3,56 + \dots + 8,95 + 35,79 + 8,38) - 233,44 = 294,62 - 233,44 = 61,18$$

- Factor suma de los cuadrados

$$S_A = \frac{A_1^2}{N_{A_1}} + \frac{A_2^2}{N_{A_2}} + \frac{A_3^2}{N_{A_3}} - C.F. = \frac{17,99^2}{9} + \frac{27,29^2}{9} + \frac{34,11^2}{9} - 233,44 = 14,55$$

- Grados de libertad

$$f_T = n - 1 = 27 - 1 = 26$$

$$f_A = 3 - 1 = 2$$

$$f_e = 26 - 2 - 2 - 2 - 2 - 4 - 4 - 4 = 6$$

- Varianza

$$V_A = \frac{S_A}{f_A} = \frac{14,55}{2} = 7,275$$

- Porcentaje de influencia

$$P_A = \frac{S_A}{S_T} = \frac{14,55}{61,18} \cdot 100\% = 23,78\%$$

- **Intervalo de confianza:**

El intervalo de confianza permite verificar un rango donde los valores óptimos de rugosidad se desarrollan.

Número efectivo de replicaciones, este dato es tomado de la Tabla 35 de prueba F de Fisher con nivel de confianza del 95%.

Factor A:

$$F(1, n_2) = F(1, 12) = 4.965$$

$$N_e = \frac{n}{DOF_{media} + DOF_{totales}} = \frac{27}{1 + 2} = 9$$

$$C.I. = \pm \sqrt{F(1, n_2) \cdot \frac{V_e}{N_e}} = \sqrt{4.965 \cdot \frac{0.32}{9}} = \pm 0.42$$

2.3. Optimización de parámetros de corte cilindrado

La herramienta utilizada es la cuchilla obtenida en el proceso de Taguchi de obtención de la geometría de la cuchilla de cilindrado la cual está detallada en la Tabla 37.

2.3.1. Aplicación método Taguchi

2.3.2. Definición de factores y niveles

Una vez seleccionada la cuchilla óptima se procede la obtención de parámetros de mecanizado, para este proceso se selecciona los parámetros dependientes e independientes a estudiar.

Para determinar la velocidad de corte se precisa conocer la respuesta del material cuando trabaja a cierto número de revoluciones por minuto además del avance de la herramienta y su profundidad de corte, en este caso es necesario variar los parámetros mencionados y evaluar los resultados obtenidos para calcular la velocidad de corte. Los valores nominales fueron escogidos de los disponibles en el torno Emco 17D:

Parámetros independientes:

- **Avance (A_v):** Se escoge un avance 0,112 debido a que valores por debajo de este son muy lentos, el avance de 0,562 fue escogido debido a que en los experimentos realizados en el acercamiento para selección de una cuchilla adecuada las rugosidades obtenidas no estaban dentro del rango de medición del instrumento, en tal caso se seleccionó un avance menor por último, el avance de 0,337 es un valor intermedio y muy cercano a los valores superiores e inferiores del mismo además que en experimentos previos no fue estudiado.
- **Revoluciones por minuto (rpm):** Así como fueron escogidos los valores nominales del avance de la herramienta, el análisis para selección de rpm se lo hace en base a los valores que ofrece el torno y las respuestas obtenidas en los experimentos de acercamiento de la cuchilla y la optimización de la misma, se utiliza un valor máximo de 2000 rpm debido a que el torno a velocidades

superiores puede generar vibraciones, 680 rpm fue escogido dado que el instrumento de medición de rugosidad trabajó normalmente en experimentos previos antes mencionados y 1340 rpm es una velocidad intermedia entre los dos límites antes mencionados, cabe destacar que el torno ofrece una variación de 10 rpm entre cada valor nominal.

- **Profundidad de corte (A_p):** Para seleccionar la profundidad de corte se tomó como referencia la utilizada en experimentos previos la cual es 2 mm, de acuerdo al comportamiento observado se tomará como valor máximo de profundidad 6 mm, para completar los tres niveles del experimento se selecciona un valor intermedio es 4 mm.

Parámetro dependiente:

- **Rugosidad superficial (R_a)**

La Tabla 38 muestra los parámetros y sus respectivos niveles para la presente etapa experimental.

Tabla 38. Factores y niveles

Parámetros	Niveles		
	1	2	3
Avance	0,112	0,337	0,562
rpm	2000	1340	680
Profundidad de corte	2	4	6

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.3.3. Selección y diseño del arreglo ortogonal

Grados de libertad del experimento:

$$T_{DF} = (3-1) \cdot 3 + (3-1) \cdot (3-1) \cdot 3 = 18$$

Según los grados de libertad obtenidos el arreglo ortogonal deben ser mayor a 18, los arreglos disponibles son L18 y L27, L18 aplica para un nivel y L27 para 3 niveles, por lo tanto el arreglo escogido es L27 [41].

El arreglo ortogonal fue armado con la ayuda del programa computacional minitab, esta herramienta computacional genera los 27 experimentos además de las interacciones entre los factores A, B y C; el arreglo obtenido está mostrado en la Tabla 39.

Tabla 39. Interacciones de los niveles entre factores

Ensayo N°	Avance	rpm	Profundidad de corte
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
4	1	2	1
5	1	2	2
6	1	2	3
7	1	3	1
8	1	3	2
9	1	3	3
10	2	1	1
11	2	1	2
12	2	1	3
13	2	2	1
14	2	2	2
15	2	2	3
16	2	3	1
17	2	3	2
18	2	3	3
19	3	1	1
20	3	1	2
21	3	1	3
22	3	2	1
23	3	2	2
24	3	2	3
25	3	3	1
26	3	3	2
27	3	3	3

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.3.4. Resultados del experimento

Una vez realizados los 27 experimentos generados mediante el arreglo ortogonal L27 se obtiene los resultados mostrados en la Tabla 40.

Tabla 40. Datos y resultados obtenidos de parámetros de mecanizado

Ensayo N°	Avance	rpm	Profundidad	R1	R2	R3	Ra (μm)
1	0,112	2000	2	1,754	2,067	2,022	1,948
2	0,112	2000	4	1,50	1,55	1,66	1,57
3	0,112	2000	6	1,65	1,23	1,70	1,53
4	0,112	1340	2	3,46	3,45	3,38	3,43
5	0,112	1340	4	2,63	2,68	2,63	2,65
6	0,112	1340	6	2,71	2,33	2,37	2,47
7	0,112	680	2	1,93	1,81	1,90	1,88
8	0,112	680	4	2,72	3,38	2,44	2,84
9	0,112	680	6	2,21	2,18	2,12	2,17
10	0,337	2000	2	3,29	3,21	3,16	3,22
11	0,337	2000	4	3,92	3,83	3,88	3,88
12	0,337	2000	6	3,12	3,06	3,09	3,09
13	0,337	1340	2	3,55	3,68	3,54	3,59
14	0,337	1340	4	3,44	3,53	3,50	3,49
15	0,337	1340	6	3,00	3,24	3,18	3,14
16	0,337	680	2	3,41	3,62	3,75	3,59
17	0,337	680	4	3,51	3,68	3,63	3,61
18	0,337	680	6	3,63	3,51	3,61	3,58
19	0,562	2000	2	8,81	9,06	8,97	8,95
20	0,562	2000	4	8,92	8,97	8,58	8,82
21	0,562	2000	6	8,66	9,40	9,46	9,17
22	0,562	1340	2	8,47	8,71	8,61	8,60
23	0,562	1340	4	8,73	8,83	8,77	8,78
24	0,562	1340	6	8,90	8,33	9,12	8,79
25	0,562	680	2	9,21	9,11	9,06	9,13
26	0,562	680	4	8,79	8,70	9,00	8,83
27	0,562	680	6	8,45	8,51	8,57	8,51

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- **Resultados obtenidos:**

En la Figura 31 se muestran las rugosidades obtenidas con el avance 0,112 la profundidad de pasada y las revoluciones por minuto empleadas.

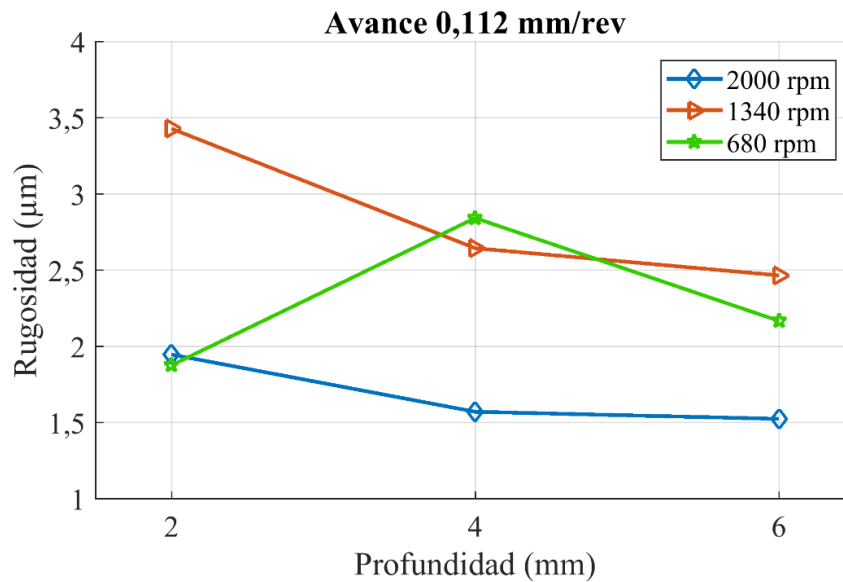


Figura 31. Rugosidad vs rpm, avance 0,112 mm/rev. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

En la Figura 32 se muestran las rugosidades obtenidas con el avance 0,337; la profundidad de pasada y las revoluciones por minuto empleadas.

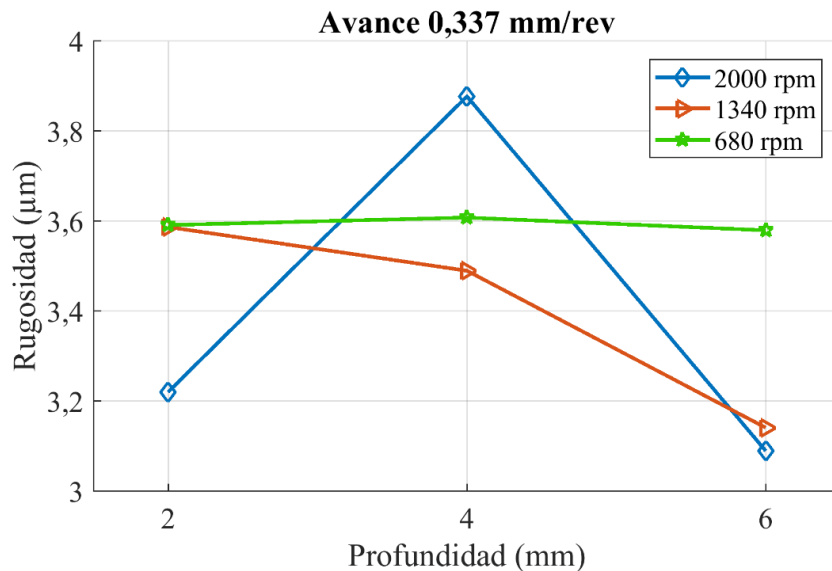


Figura 32. Rugosidad vs rpm, avance 0,337 mm/rev. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

En la Figura 33 se muestran las rugosidades obtenidas con el avance 0,562; la profundidad de pasada y las revoluciones por minuto empleadas.

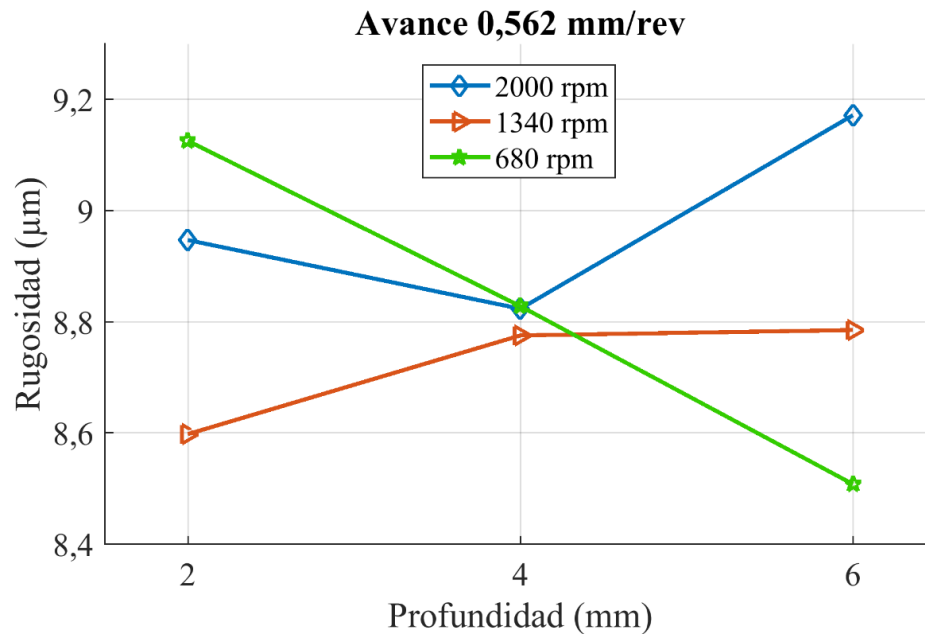


Figura 33. Rugosidad vs rpm, avance 0,562 mm/rev. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

La Tabla 41 se muestra los parámetros de mecanizado utilizados para obtener la menor rugosidad de entre los experimentos realizados.

Tabla 41. Menor rugosidad en parámetros de mecanizado en cilindrado

Ensayo N°	Avance	RPM	Profundidad	R1	R2	R3	Ra
3	0,112	2000	6	1,65	1,23	1,70	1,53

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.3.5. Resultados método ANOVA

Como se muestra en la Tabla 42 el Parámetro A es aquel que más influencia tiene en el proceso, de la misma tabla se extrae factor F el cual será utilizado para determinar si el factor es influyente o no, esto se lo realiza mediante una hipótesis estadística.

Tabla 42. Resultados de método ANOVA en parámetros de mecanizado cilindrado

Parámetro	f	S	V	F	P
Avance	2	220,25	110,12	542,01	98,18
RPM	2	0,44	0,22	1,09	0,20
Profundidad	2	0,29	0,14	0,70	0,13
Error	12	2,44	0,20		0,09

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.3.6. Porcentaje de influencia

Tabla 43. Influencia de parámetros de mecanizado

Parámetro	Influencia
Avance	97,6%
rpm	-
Profundidad de corte	-

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.3.7. Evaluación de la media de cada nivel

En la Tabla 44 se muestra la evaluación de la media de cada nivel.

Tabla 44. Evaluación de la media de cada nivel

Parámetro	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Avance	2,28	3,46	8,84
rpm	4,69	4,99	4,90
Profundidad de corte	4,92	4,94	4,72

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

La Figura 34 muestra de manera gráfica el comportamiento de los efectos de las medias de cada factor evaluado.

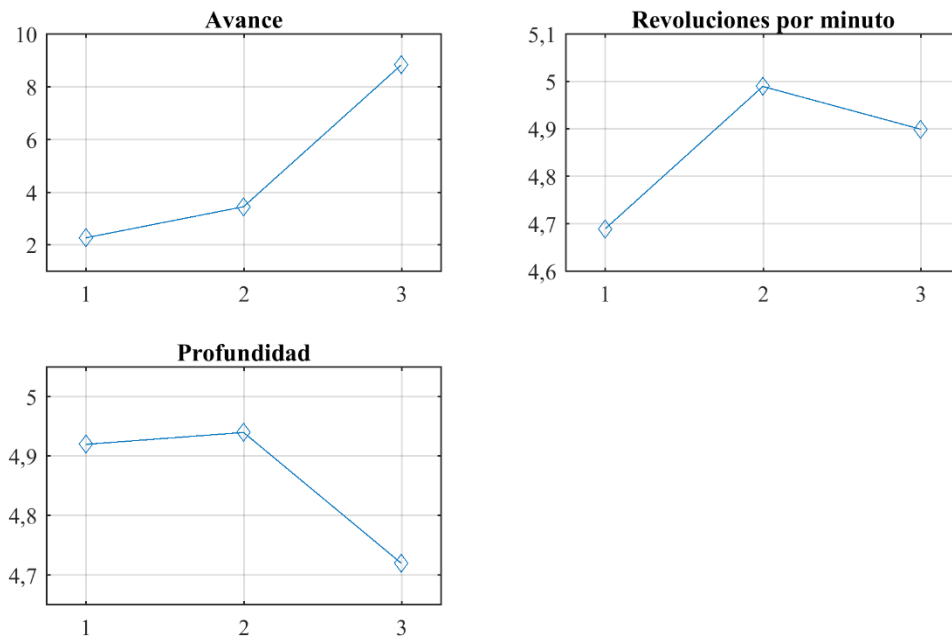


Figura 34. Efecto de la media de cada parámetro de mecanizado. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.3.8. Parámetros óptimos

Mediante las gráficas de respuesta de la media de cada parámetro estudiado se obtiene los parámetros influyentes para la obtención de la rugosidad óptima, en este caso se selecciona los valores mínimos de cada media dado que el objetivo es obtener la rugosidad mínima, los cuales se exponen en la Tabla 45.

Tabla 45. Parámetros óptimos resultantes del método Taguchi

Parámetro	Nivel	Valor
Avance (mm/rev)	1	0,112
RPM (rpm)	1	2000
Profundidad (mm)	3	6

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.3.9. Cálculo de velocidad de corte

Para el cálculo de velocidad de corte se utiliza la fórmula 16 detallada en el capítulo 1, para efecto de los datos se toma de las tres mejores rugosidades de los experimentos que fueron ejecutados con avances de 0,112; 0,337 y 0,562.

Donde:

$$D = 40,5 \text{ mm}$$

Ejemplo de cálculo

$$V_c = \frac{40,5 \text{ mm} \cdot \pi \cdot 2000 \text{ mm}}{1000} = 254,7 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Luego de aplicar la fórmula detallada anteriormente se obtienen los valores de velocidad de corte óptimo para cada avance.

La Tabla 46 detalla las velocidades de corte obtenidas, correspondientes al avance 0,112.

Tabla 46. Tabla de resultados 1

Parámetro	Avance		
	0,112		
Vc	254,47	254,47	86,52
Profundidad	6	4	2
rpm	2000	2000	680
Ra	1,525	1,572	1,877

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

La

Tabla 47 detalla las velocidades de corte obtenidas, correspondientes al avance 0,337.

Tabla 47. Tabla de resultados 2

Parámetro	Avance		
	0,337		
Vc	254,47	170,49	254,47
Profundidad	6	6	2
Rpm	2000	1340	2000
Ra	3,089	3,141	3,220

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

La Tabla 48 detalla las velocidades de corte obtenidas con avance 0,562 mm/rev.

Tabla 48. Tabla de resultados 3

Parámetros	Avance		
	0,562		
Vc	86,52	170,49	170,49
Profundidad	6	2	4
rpm	680	1340	1340
Ra	8,508	8,598	8,776

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Se realizó un experimento donde los parámetros de corte son los detallados en la Tabla 49, con el fin de analizar el comportamiento del material y la herramienta con una profundidad de pasada mínima.

Tabla 49. Tabla de resultados 4

Parámetros	Avance
	0,112
Vc	254,47
Profundidad	0,50

2.4. Obtención de cuchilla de refrentado

2.4.1. Selección de geometría general para cuchillas de refrentado

Para la cuchilla de refrentado, se ha seleccionado el modelo representado en la Figura 35.

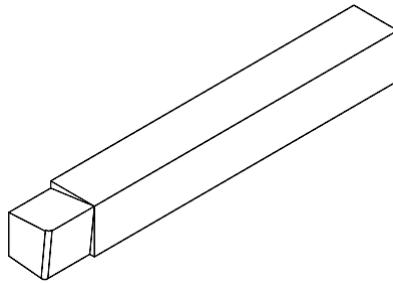


Figura 35. Cuchilla de refrentado seleccionada. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Donde la nomenclatura de los ángulos es la mostrada en la Figura 36 y Figura 37:

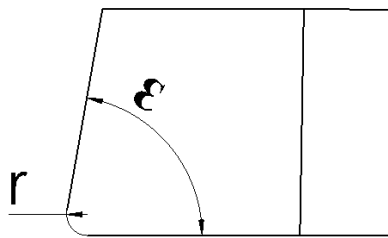


Figura 36. Vista superior de la cuchilla de cilindrado. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Donde:

ε : Ángulo de punta

r : Radio de punta

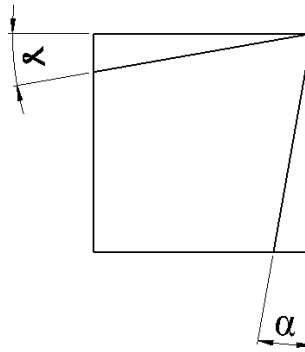


Figura 37. Vista frontal cuchilla de refrentado. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Donde:

γ : Ángulo de ataque

α : Ángulo de despullo

2.4.2. Parámetros geométricos iniciales

Para determinar los valores de los ángulos descritos anteriormente, se utilizaron los valores de ángulo de desprendimiento e inclinación obtenida de la cuchilla de cilindrado, para el ángulo de ataque se utilizará un valor de 85° [42].

Los valores detallados en la Tabla 50 serán datos de partida para la generación de un arreglo ortogonal.

Tabla 50. Valores iniciales

Ángulo de punta	Ángulo de despullo	Ángulo de ataque	Radio de punta
85°	6°	8°	0,7 mm

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.4.3. Definición de parámetros y niveles

A continuación, para la elaboración de los niveles se toman valores de 2 ° de diferencia, para aumentar o disminuir a partir de los valores iniciales descritos en la Tabla 50 y de 1 mm en el radio de punta hacia abajo, en la Tabla 51 se muestran los parámetros y sus respectivos niveles.

Tabla 51. Factores y niveles

Parámetros		Niveles		
		1	2	3
Ángulo de punta	ε	87 °	85 °	83 °
Ángulo de despullo	α	4 °	6 °	8 °
Ángulo de ataque	γ	6 °	8 °	10 °
Radio de punta	r	0,5 mm	0,6 mm	0,7 mm

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

a. Selección y diseño de arreglo ortogonal

- Grados de libertad del experimento

Grado de libertad:
$$T_{DF} = (3 - 1) \cdot 4 + (3 - 1) \cdot (3 - 1) \cdot 3 = 20$$

Según los grados de libertad obtenidos, el arreglo ortogonal debe ser mayor a 20, el arreglo disponible es L27 el cual ya fue utilizado en la optimización de la cuchilla de cilindrado. Por lo tanto, el arreglo seleccionado es L27.

Para aplicar las condiciones mencionadas se ha empleado el software Minitab, el cual luego de ser configurado genera el arreglo ortogonal de 27 ensayos, el cual se muestra en la Tabla 52.

Tabla 52. Arreglo ortogonal geometría cuchilla refrentado

Ensayo N°	Ángulo de punta	Ángulo de despullo	Ángulo de ataque	Radio de punta
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	2
5	1	2	2	3
6	1	2	3	1
7	1	3	1	3
8	1	3	2	1
9	1	3	3	2
10	2	1	1	1
11	2	1	2	2
12	2	1	3	3
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2
19	3	1	1	1
20	3	1	2	2
21	3	1	3	3
22	3	2	1	2
23	3	2	2	3
24	3	2	3	1
25	3	3	1	3
26	3	3	2	1
27	3	3	3	2

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.4.4. Resultados del experimento

Una vez realizados los experimentos mediante el arreglo ortogonal L27 se obtienen los siguientes resultados mostrados en la Tabla 53.

Tabla 53. Resultados de mecanizado

Ensayo N°	Ángulo de punta	Ángulo de despullo	Ángulo de ataque	Radio de punta	R1	R2	R3	Ra (μm)
1	87°	4°	6°	0,5	1,161	1,263	1,201	1,208
2	87°	4°	8°	0,6	1,090	1,183	1,140	1,138
3	87°	4°	10°	0,7	1,031	1,026	0,987	1,015
4	87°	6°	6°	0,6	1,707	1,687	1,688	1,694
5	87°	6°	8°	0,7	1,886	1,884	1,883	1,884
6	87°	6°	10°	0,5	1,648	1,632	1,632	1,637
7	87°	8°	6°	0,7	1,197	1,398	1,445	1,347
8	87°	8°	8°	0,5	1,128	1,123	1,209	1,153
9	87°	8°	10°	0,6	1,603	1,590	1,637	1,610
10	85°	4°	6°	0,5	1,087	1,061	1,088	1,079
11	85°	4°	8°	0,6	1,080	1,126	1,204	1,137
12	85°	4°	10°	0,7	1,681	1,646	1,656	1,661
13	85°	6°	6°	0,6	1,067	1,218	1,129	1,138
14	85°	6°	8°	0,7	1,540	1,619	1,660	1,606
15	85°	6°	10°	0,5	1,071	1,022	1,090	1,061
16	85°	8°	6°	0,7	1,828	1,815	1,825	1,823
17	85°	8°	8°	0,5	0,730	0,724	0,716	0,723
18	85°	8°	10°	0,6	2,596	2,806	2,093	2,498
19	83°	4°	6°	0,5	1,200	1,239	1,269	1,236
20	83°	4°	8°	0,6	1,042	0,975	0,987	1,001
21	83°	4°	10°	0,7	1,398	1,384	1,884	1,555
22	83°	6°	6°	0,6	3,613	7,282	4,733	5,209
23	83°	6°	8°	0,7	2,182	1,493	1,693	1,789
24	83°	6°	10°	0,5	1,336	1,548	1,303	1,396
25	83°	8°	6°	0,7	2,973	3,646	2,973	3,197
26	83°	8°	8°	0,5	1,108	1,162	1,141	1,137
27	83°	8°	10°	0,6	1,061	0,929	0,950	0,980

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

En las siguientes figuras se resumen los resultados de los experimentos de manera gráfica, con el fin de apreciar de manera visual el comportamiento de las cuchillas de refrentado en función de los parámetros de mecanizado establecidos y las rugosidades obtenidas. Los valores de los radios 0,5 mm, 0,6 mm y 0,7 mm se indican en cada punto de intersección entre ángulo de desprendimiento y rugosidad.

En la Figura 38 se indican los valores obtenidos de rugosidad con la cuchilla de refrentado de ángulo de punta 87 °. Los valores 4 °, 6 ° y 8 ° de los ángulos de despullo se indican mediante las trayectorias

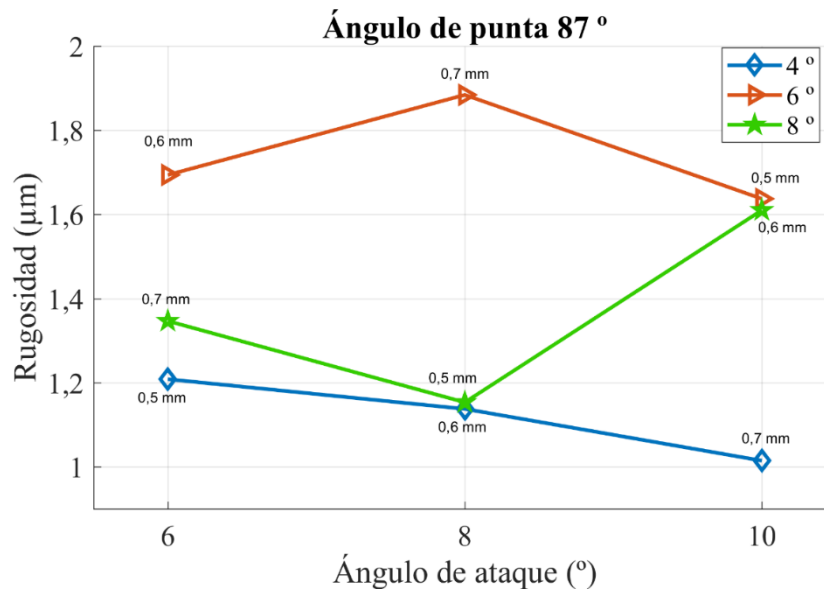


Figura 38. Rugosidades vs ángulo de punta 87 °. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

En la Figura 39, se indican los valores obtenidos de rugosidad con la cuchilla de refrentado de ángulo de punta 85 °. Los valores 4 °, 6 ° y 8 ° de los ángulos de despullo se indican mediante las trayectorias

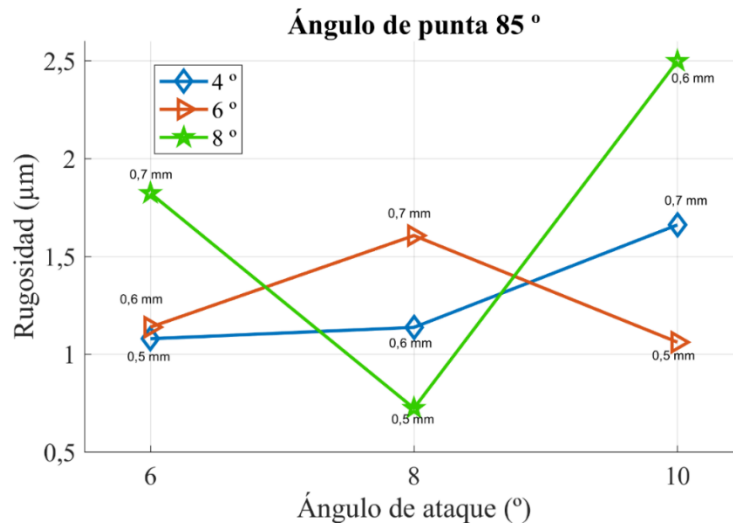


Figura 39. Rugosidades vs ángulo de punta 85 °. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

En la Figura 40, se indican los valores obtenidos de rugosidad con la cuchilla de refrentado de ángulo de punta 83 °. Los valores 4 °, 6 ° y 8 ° de los ángulos de despulpe se indican mediante las trayectorias

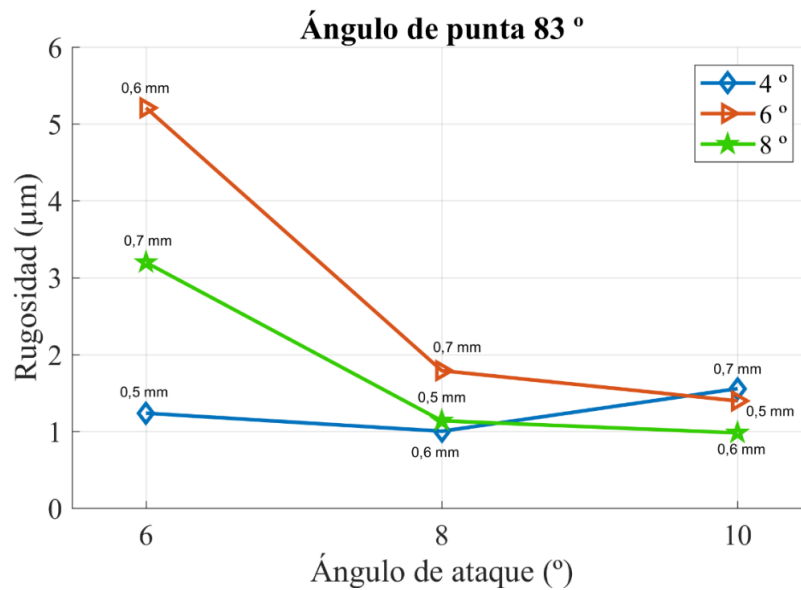


Figura 40. Rugosidades vs ángulo de punta 83 °. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Resultado de mecanizado:

De la Tabla 53 se extrae el experimento con menor rugosidad, la cual se muestra en la siguiente Tabla 54:

Tabla 54. Menor rugosidad obtenida

Ensayo	Ángulo de punta	Ángulo de despullo	Ángulo de ataque	de Radio de punta	Rugosidad Ra (μm)
17	85°	8°	8°	0,5 mm	0,723

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.4.5. Resultados método ANOVA

Tabla 55. Resultados de método ANOVA en parámetros geométricos refrentado

Parámetro	f	S	V	F	P
Ángulo de ataque	2	1,70	0,85	0,94	8,34
Ángulo de inclinación	2	2,27	1,13	1,26	11,11
Ángulo de desprendimiento	2	2,38	1,19	1,32	11,65
Radio de punta	2	2,27	1,13	1,26	11,09
Error	6	5,41			0,04

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.4.6. Porcentaje de influencia

Tabla 56. Influencia de los factores

Parámetro	Influencia
Ángulo de punta	8%
Ángulo de despullo	11%
Ángulo de ataque	12%
Radio de punta	11%

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.4.7. Evaluación de la media de cada nivel

Tabla 57. Evaluación de la media de cada nivel

Parámetro	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Ángulo de ataque	1,410	1,414	1,94
Ángulo de inclinación	1,23	1,94	1,61
Ángulo de desprendimiento	1,99	1,29	1,49
Radio de punta	1,18	1,82	1,76

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

La Figura 41 muestra de manera gráfica el comportamiento de los efectos de las medias de cada factor evaluado.

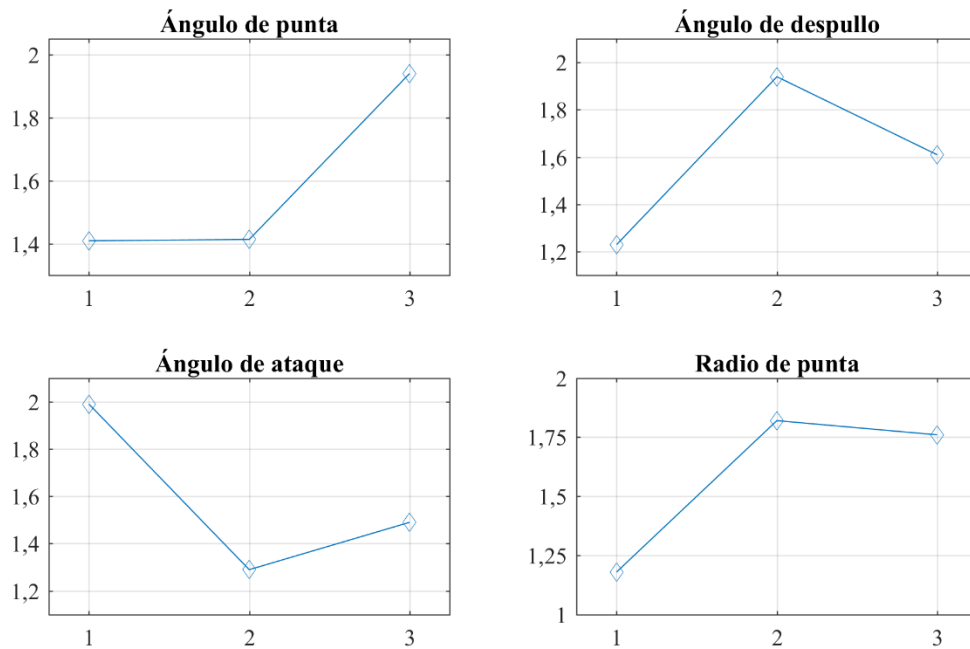


Figura 41. Efecto de la media de los factores de la cuchilla de refrentado. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.4.8. Parámetros óptimos

Mediante las gráficas de respuesta de la media de cada parámetro estudiado se obtiene los parámetros óptimos de la geometría de la herramienta, los cuales son los detallados en la Tabla 58:

Tabla 58. Parámetros óptimos

Parámetro	Nivel	Valor
Ángulo de punta	1	3 °
Ángulo de despullo	1	4 °
Ángulo de ataque	2	8 °
Radio de punta	1	0,5 mm

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.5. Comprobación de parámetros

Con el fin de verificar los resultados obtenidos en parámetros geométricos, así como de mecanizado en el proceso de cilindrado y refrentado se procede a utilizar dichos parámetros en diferentes ensayos donde cambia el diámetro de la probeta.

Para la operación de refrentado se toma los valores de avances del torno disponibles los cuales deben ser similares a los de cilindrado.

2.5.1. Parámetros de comprobación

Los parámetros utilizados para cilindrado y refrentado se presentan en la Tabla 59.

Tabla 59. Parámetros de comprobación

Avance (mm/rev)		Velocidad de corte (m/min)	Diámetro (mm)
Cilindrado	Refrentado		
0,112	0,118	254,47	20
0,337	0,348	170,49	60
0,562	0,406	86,52	80

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.5.2. Cálculo de RPM

Para el cálculo de rpm se utiliza la ecuación 18 presentada en el capítulo 1, para efectos de evitar vibración excesiva la velocidad máxima será 2000 rpm. Los parámetros de mecanizado para las operaciones de cilindrado se muestran a continuación en la Tabla 60.

Tabla 60. Parámetros de mecanizado para cilindrado

Cilindrado				
Avance	Velocidad de corte	Diámetro	rpm	rpm real
0,112	254,47	20	4050	2000
		60	1350	1350
		80	1013	1010
0,337	170,49	20	2713	2000
		60	904	900
		80	678	680
0,562	86,52	20	1377	1380
		60	459	460
		80	344	340

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Los parámetros de mecanizado para las operaciones de refrentado se muestran a continuación en la Tabla 61.

Tabla 61. Parámetros de mecanizados para refrentado

Avance	Velocidad de corte	Refrentado		
		Diámetro	rpm	rpm real
0,118	254,47	10	8100	2000
		30	2700	2000
		40	2025	2000
0,348	170,49	10	5427	2000
		30	1809	1810
		40	1357	1360
0,406	86,52	10	2754	2000
		30	918	920
		40	689	670

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

El valor del diámetro en el refrentado es reducido a la mitad para trabajar con el promedio debido a la variación continua de diámetro en la operación de mecanizado.

2.5.3. Ensayos de comprobación

La comprobación es realizada afilando dos cuchillas de cilindrado, así como dos cuchillas de refrentado.

2.5.4. Cuchilla de cilindrado 1

En la Tabla 62 se detallan los resultados obtenidos con la cuchilla de cilindrado 1 al trabajar con los parámetros de mecanizado para cilindrado.

Tabla 62. Parámetros de mecanizado y rugosidades obtenidas con herramienta de cilindrado 1

Ensayo N°	Diámetro	Avance	Velocidad de corte	rpm	Ra
1,1	20	0,112	254,47	4050	1,74
2,1		0,337	170,49	2713	6,07
3,1		0,562	86,52	1377	10,52
1,2	60	0,112	254,47	1350	2,05
2,2		0,337	170,49	904	5,59
3,2		0,562	86,52	459	9,84
1,3	80	0,112	254,47	1013	2,51
2,3		0,337	170,49	678	4,34
3,3		0,562	86,52	344	9,61

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

En la Figura 42, se puede apreciar el comportamiento de la cuchilla de cilindrado 1 y los parámetros de mecanizado establecidos, en función de la rugosidad obtenida.

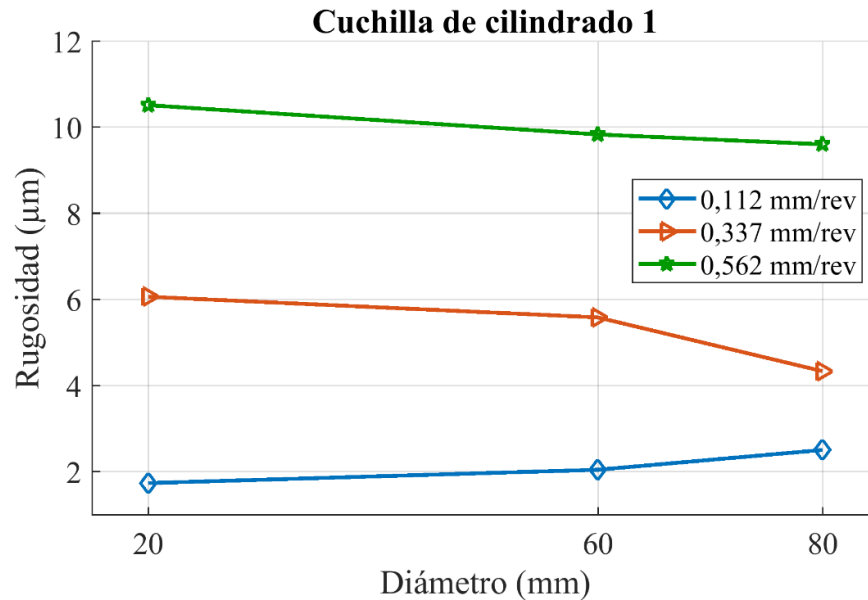


Figura 42. Rugosidad vs diámetro en función del avance con cuchilla de cilindrado 1. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Como se muestra en la Tabla 63, las rugosidades de avance de 0,112 mm/rev, están dentro de un rango de 1,74 μm a 2,51 μm , corresponden a la categoría semi-fina para operaciones de acabado.

Tabla 63. Caracterización de ensayos con avance 0,112 mm/rev y cuchilla de cilindrado1

Avance 0,112 mm/rev			
Diámetro mm	Rugosidad μm	N	Caracterización
20	1,74	N16	SEMI FINO
60	2,05	N16	SEMI FINO
80	2,51	N16	SEMI FINO

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Como se muestra en la Tabla 64, las rugosidades de avance 0,337 mm/rev, están dentro de un rango de 4,34 μm a 6,07 μm , corresponden a la categoría regular para operaciones de desbaste moderado.

Tabla 64. Caracterización de ensayos con avance 0,337 mm/rev y cuchilla de cilindrado 1

Avance 0,337 mm/rev			
Diámetro mm	Rugosidad μm	N	Caracterización
20	6,07	N15	REGULAR
60	5,59	N15	REGULAR
80	4,34	N15	REGULAR

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Como se muestra en la Tabla 65, las rugosidades de avance 0,562 mm/rev están dentro de un rango de 9,61 μm a 10,52 μm , corresponden a la categoría semi-regular para operaciones de desbaste rápido.

Tabla 65. Caracterización de ensayos con avance 0,562 mm/rev y cuchilla de cilindrado 1

Avance 0,562 mm/rev			
Diámetro mm	Rugosidad μm	N	Caracterización
20	10,52	N15	SEMI REGULAR
60	9,84	N15	SEMI REGULAR
80	9,61	N15	SEMI REGULAR

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.5.5. Cuchilla de cilindrado 2

En la Tabla 66 se detallan los resultados obtenidos con la cuchilla de cilindrado 2 al trabajar con los parámetros de mecanizado para cilindrado.

Tabla 66. Parámetros de mecanizado y rugosidades obtenidas con herramienta de cilindrado 2

Ensayo Nº	Diámetro mm	Avance mm/rev	Velocidad de corte	RPM	Ra
1,1	20	0,112	254,47	4050	1,53
2,1		0,337	170,49	2713	2,28
3,1		0,562	86,52	1377	8,36
1,2	60	0,112	254,47	1350	1,06
2,2		0,337	170,49	904	2,12
3,2		0,562	86,52	459	6,92
1,3	80	0,112	254,47	1013	1,20
2,3		0,337	170,49	678	2,57
3,3		0,562	86,52	344	6,82

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

En la Figura 43, se puede apreciar el comportamiento de la cuchilla de cilindrado 2 y los parámetros de mecanizado establecidos, en función de la rugosidad obtenida.

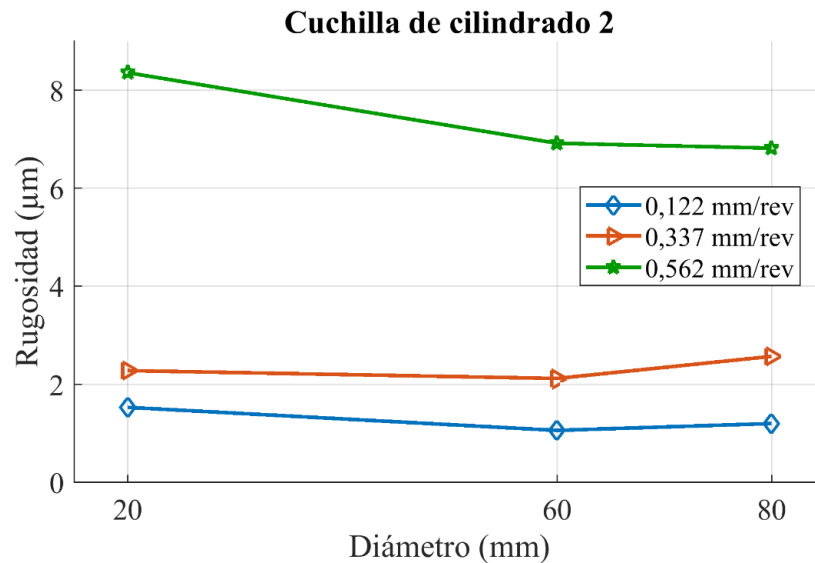


Figura 43. Rugosidad vs diámetro en función del avance con cuchilla de cilindrado 2. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Como se muestra en la Tabla 67, las rugosidades de avance de 0,112 mm/rev, están dentro de un rango de 1,06 μm a 1,53 μm , corresponden a la categoría fina para operaciones de acabado.

Tabla 67. Caracterización de ensayos con avance 0,112 mm/rev y cuchilla de cilindrado 2

Avance 0,112 mm/rev			
Diámetro mm	Rugosidad μm	N	Caracterización
20	1,53	N17	FINO
60	1,06	N17	FINO
80	1,20	N17	FINO

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Como se muestra en la Tabla 68, las rugosidades de avance de 0,337 mm/rev, están dentro de un rango de 2,12 μm a 2,57 μm , corresponden a la categoría semi fina para operaciones de desbaste moderado.

Tabla 68. Caracterización de ensayos con avance 0,337 mm/rev y cuchilla de cilindrado 2

Avance 0,337 mm/rev			
Diámetro	Rugosidad	N	Caracterización
mm	μm		
20	2,28	N16	SMI EFINO
60	2,12	N16	SEMI FINO
80	2,57	N16	SEMI FINO

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Como se muestra en la Tabla 69, las rugosidades de avance de 0.562 mm/rev, están dentro de un rango de 6.82 μm a 8.36 μm, corresponden a la categoría semi regular para operaciones de desbaste rápido.

Tabla 69. Caracterización de ensayos con avance 0,562 mm/rev y cuchilla de cilindrado 2

Avance 0,562 mm/rev			
Diámetro	Rugosidad	N	Caracterización
mm	μm		
20	8,36	N14	SEMI REGULAR
60	6,92	N14	SEMI REGULAR
80	6,82	N14	SEMI REGULAR

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Como se puede apreciar al desarrollar los ensayos, las rugosidades superficiales obtenidas se encuentran dentro del rango establecido como se indica en la Tabla 13 para las respectivas operaciones de acabado, desbaste moderado y desbaste rápido en torneado.
- Los resultados obtenidos con la cuchilla de cilindrado 2, son superiores a la cuchilla de cilindrado 1.

2.5.6. Cuchilla de refrentado 1

En la Tabla 70 se detallan los resultados obtenidos con la cuchilla de refrentado 1, al trabajar con los parámetros de mecanizado para refrentado.

Tabla 70. Parámetros de mecanizado y rugosidades obtenidas con herramienta de refrentado 1

Ensayo Nº	Diámetro	Avance	Velocidad de corte	rpm	Rugosidad Ra μm
1,1	20	0,118	254,47	8000	1,22
1,2		0,348	170,49	5427	1,93
1,3		0,406	86,52	2754	2,43
2,1	60	0,118	254,47	2700	1,26
2,2		0,348	170,49	1809	2,78
2,3		0,406	86,52	918	4,85
3,1	80	0,118	254,47	2025	2,50
3,2		0,348	170,49	1357	4,46
3,3		0,406	86,52	689	3,51

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha

En la Figura 44, se puede apreciar el comportamiento de la cuchilla de refrentado 1 y los parámetros de mecanizado establecidos, en función de la rugosidad obtenida.

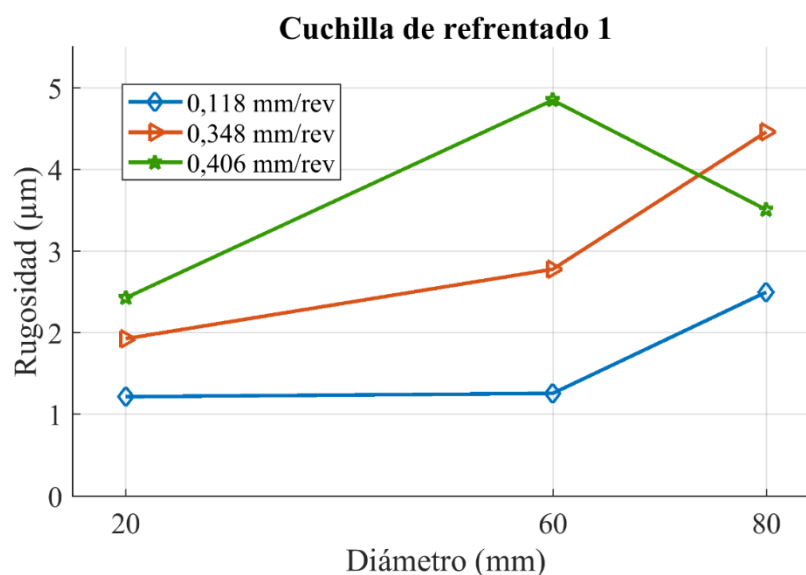


Figura 44. Rugosidad vs diámetro en función del avance con cuchilla de refrentado 1. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Como se muestra en la Tabla 71, las rugosidades de avance de 0,118 mm/rev están dentro de un rango de 1,22 μm a 2,50 μm , corresponden a la categoría fina y semi fina para operaciones de acabado.

Tabla 71. Caracterización de ensayos con avance 0,118 mm/rev y cuchilla de refrentado 1

Avance 0,118 mm/rev			
Diámetro mm	Rugosidad μm	N	Caracterización
20	1,22	N17	FINO
60	1,26	N17	FINO
80	2,50	N16	SEMI FINO

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Como se muestra en la Tabla 72, las rugosidades de avance de 0,348 mm/rev, están dentro de un rango de 1.93 μm a 4.46 μm , corresponden a la categoría semi fina para operaciones de desbaste moderado.

Tabla 72. Caracterización de ensayos con avance 0,348 mm/rev y cuchilla de refrentado 1

Avance 0,348 mm/rev			
Diámetro mm	Rugosidad μm	N	Caracterización
20	1,93	N16	SEMI FINO
60	2,78	N16	SEMI FINO
80	4,46	N16	REGULAR

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Como se muestra en la Tabla 73, las rugosidades con avance de 0,406 mm/rev para desbaste rápido van desde 2,43 μm hasta 4,85 μm , corresponden a la categoría semi fina y regular para operaciones de desbaste rápido.

Tabla 73. Caracterización de ensayos con avance 0,406 mm/rev y cuchilla de refrentado 1

Avance 0,406 mm/rev			
Diámetro mm	Rugosidad μm	N	Caracterización
20	2,43	N16	SEMI FINO
60	4,85	N15	REGULAR
80	3,51	N15	REGULAR

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Se observa que la rugosidad tiende a mejorar en cada avance a medida que el diámetro de las probetas disminuye.

2.5.7. Cuchilla de refrentado 2

En la Tabla 74 se detallan los resultados obtenidos con la cuchilla de refrentado #2 al trabajar con los parámetros de mecanizado para refrentado.

Tabla 74. Parámetros de mecanizado y rugosidades obtenidas con herramienta de refrentado 2

Ensayo N°	Diámetro	Avance	Velocidad de corte	rpm	Ra
1,1	20	0,118	254,47	8000	1,80
2,1		0,348	170,49	5427	5,83
3,1		0,406	86,52	2754	6,09
1,2	60	0,118	254,47	2700	1,53
2,2		0,348	170,49	1809	4,95
3,2		0,406	86,52	918	5,31
1,3	80	0,118	254,47	2025	1,06
2,3		0,348	170,49	1357	4,86
3,3		0,406	86,52	689	5,23

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

En la Figura 45, se puede apreciar el comportamiento de la cuchilla de refrentado 2 y los parámetros de mecanizado establecidos, en función de la rugosidad obtenida.

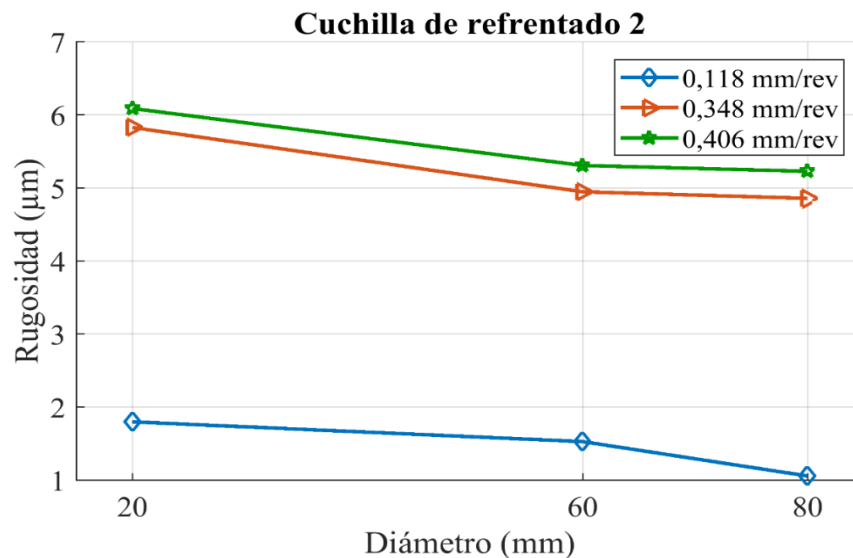


Figura 45. Rugosidad vs diámetro en función del avance con cuchilla de refrentado 2. Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Como se muestra en la Tabla 75, las rugosidades de avance de 0,118 mm/rev están dentro de un rango de 1,06 μm a 1,80 μm , corresponden a la categoría fina para operaciones de acabado.

Tabla 75. Caracterización de ensayos con avance 0,118 mm/rev y cuchilla de refrentado 2

Avance 0,118 mm/rev			
Diámetro mm	Rugosidad μm	N	Caracterización
20	1,80	N16	SEMI FINO
60	1,53	N17	FINO
80	1,06	N17	FINO

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Como se muestra en la Tabla 76, las rugosidades de avance de 0,348 mm/rev están dentro de un rango de 4,86 μm a 5,83 μm , corresponden a la categoría fina para operaciones de desbaste moderado.

Tabla 76. Caracterización de ensayos con avance 0,348 mm/rev y cuchilla de refrentado 2

Avance 0,348 mm/rev			
Diámetro mm	Rugosidad μm	N	Caracterización
20	5,83	N15	REGULAR
60	4,95	N15	REGULAR
80	4,86	N15	REGULAR

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Como se muestra en la Tabla 77, las rugosidades de avance de 0.406 mm/rev, están dentro de un rango de 5.23 μm a 6.09 μm , corresponden a la categoría fina para operaciones de desbaste rápido.

Tabla 77. Caracterización de ensayos con avance 0,406 mm/rev y cuchilla de refrentado 2

Avance 0,406 mm/rev			
Diámetro mm	Rugosidad μm	N	Caracterización
20	6,09	N15	REGULAR
60	5,31	N15	REGULAR
80	5,23	N15	REGULAR

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Se observa que la rugosidad mejora en cada avance a medida que el diámetro de la probeta se aumenta.
- Las rugosidades obtenidas para avance rápido y moderado son muy cercanas

Conclusiones comprobación:

- Como se puede apreciar al desarrollar los ensayos, las rugosidades superficiales obtenidas se encuentran dentro del rango establecido para las respectivas operaciones de acabado, desbaste moderado y desbaste rápido.

- Al realizar ensayos con dos cuchillas se puede observar la influencia del factor radio de punta de la herramienta.
- Las rugosidades de refrentado y cilindrado independientemente de la cuchilla utilizada producen rugosidades que corresponden a las operaciones realizadas.

2.6. Análisis de costos

A continuación, se detallan los costos correspondientes al desarrollo de la tesis.

2.6.1. Costos directos

Costo de materiales

En la Tabla 78 se indica el análisis de costo de materiales, utilizando el método Taguchi.

Tabla 78. Costo de materiales utilizando el método Taguchi

Material	Unidades	Valor unitario (USD)	Valor total (USD)
OBTENCIÓN DE CUCHILLA DE CILINDRADO			
Probetas grilón Ø 40 mm	80	1,70	136,11
Cuchilla HSS 3/4 " x 4 "	3	8,75	26,25
Afilado de cuchillas HSS	5	3,00	15,00
		Total	177,36
OPTIMIZACIÓN DE LA CUCHILLA DE CILINDRADO			
Probetas grilón Ø 40 mm	27	1,70	45,90
Cuchilla HSS 3/4 " x 4 "	14	8,75	122,50
Afilado de cuchillas HSS	27	3,00	81,00
		Total	249,40
OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE MECANIZADO			
Probetas grilón Ø 40 mm	27	1,70	45,90
Cuchilla HSS 3/4 " x 4 "	1	8,75	8,75
Afilado de cuchillas HSS	1	3,00	3,00
		Total	57,65
OBTENCIÓN DE CUCHILLA DE REFRENTADO			
Probetas grilón Ø 40 mm	27	1,70	45,90
Cuchilla HSS 3/4 " x 4 "	14	8,75	122,50
Afilado de cuchillas HSS	27	3,00	81,00
		Total	249,40
COMPROBACIÓN DE PARÁMETROS DE MECANIZADO			
Probetas grilón Ø 20 mm	2	0,67	1,34
Probetas grilón Ø 60 mm	2	4,20	8,40
Probetas grilón Ø 80 mm	2	7,95	15,90
Cuchilla HSS 3/4 " x 4 "	4	8,75	35,00
Afilado de cuchillas HSS	4	3,00	12,00
		Total	72,64
		SUMA TOTAL	806,45

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- **Costos por servicios de equipos:**

Se refiere al costo por emplear varios equipos durante el desarrollo de la presente investigación, entre los cuales se pueden detallar: torno, sierra mecánica y equipo de metrología.

En la Tabla 79 se indica el análisis de costo por servicios de equipos, utilizando el método Taguchi.

Tabla 79. Costos por servicios de equipos

Servicio empleado	Tiempo (Horas)	Valor hora (USD)	Valor total (USD)
OBTENCIÓN DE CUCHILLA DE CILINDRADO			
Servicio de torno	6	10,00	60,00
Servicio de corte	1	10,00	10,00
Servicio de rugosímetro	6	5,00	30,00
		Total	100,00
OPTIMIZACIÓN DE LA CUCHILLA DE CILINDRADO			
Servicio de torno	2	10,00	20,00
Servicio de corte	0,3	10,00	3,00
Servicio de rugosímetro	2	5,00	10,00
		Total	33,00
OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE MECANIZADO			
Servicio de torno	2	10,00	20,00
Servicio de corte	0,3	10,00	3,00
Servicio de rugosímetro	2	5,00	10,00
		Total	33,00
OBTENCIÓN DE CUCHILLA DE REFRENTADO			
Servicio de torno	2	10,00	20,00
Servicio de corte	0,3	10,00	3,00
Servicio de rugosímetro	2	5,00	10,00
		Total	33,00
COMPROBACIÓN DE PARÁMETROS DE MECANIZADO			
Servicio de torno	1	10,00	10,00
Servicio de corte	0,15	10,00	1,50
Servicio de rugosímetro	1	5,00	5,00
		Total	16,50
		SUMA TOTAL	215,50

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.6.2. Costos indirectos

En la Tabla 80 se detallan los costos indirectos.

Tabla 80. Costos indirectos

Descripción	Valor (USD)
Tecnología	50,00
Material de oficina	45,00
Transporte	100,00
SUMA TOTAL	195,00

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

2.6.3. Costo Total

Con los costos directos e indirectos calculados anteriormente, se detalla en la Tabla 81 el costo total del desarrollo de la tesis.

Tabla 81. Costo total de la Tesis

Detalle	Valor (USD)
Costos directos	1451,95
Costos indirectos	195,00
SUMA TOTAL	1216,95

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

El desarrollo de la presente investigación es llevado a cabo mediante el método Taguchi, lo cual permite reducir el número de ensayos y por ende el tiempo y el costo total del proyecto.

CONCLUSIONES

- La geometría de la cuchilla de cilindrado tiene como parámetro de mayor influencia el ángulo de punta con un valor de 22.7 %, este valor confirma la importancia de este ángulo, los demás ángulos tienen una diferencia significativa respecto al ángulo de punta como se puede mostrar en la tabla a continuación:

Parámetro	Influencia
Ángulo de punta	22,7 %
Ángulo de despullo	14,0 %
Ángulo de ataque	6,4 %
Radio de punta	5,9 %

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Los parámetros de corte presentan una diferencia muy marcada dado que el avance tiene un porcentaje de influencia del 97.6 % lo que descarta el trabajo realizado por los parámetros restantes como lo son revoluciones por minuto y profundidad de corte, esto se puede apreciar en la siguiente tabla:

Parámetro	Influencia
Avance	97,6 %
rpm	0,2 %
Profundidad	0,13 %

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- La influencia de los parámetros geométricos de la cuchilla de refrentado son parejos debido a que se utilizan los ángulos de la cuchilla óptima de cilindrado, esto comprueba la validez de los parámetros estudiados anteriormente, dichos parámetros son mostrados a continuación:

Parámetro	Influencia
Ángulo de punta	8 %
Ángulo de despullo	11 %
Ángulo de ataque	12 %
Radio de punta	11 %

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Los parámetros de geométricos de la cuchilla de cilindrado se definen por medio de la selección de ángulos siendo complementado por la optimización de los mismos donde se analizó parámetros como la rugosidad mínima obtenida de los experimentos, así como evitar que la viruta se enrede tanto en la herramienta y material a mecanizar. Los parámetros geométricos óptimos de esta herramienta son:

Parámetro	Valor
Ángulo de punta	45 °
Ángulo de despullo	6 °
Ángulo de ataque	8 °
Radio de punta	0,7 mm

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Los parámetros de mecanizado fueron definidos utilizando las capacidades del torno donde se utiliza la cuchilla óptima de cilindrado, los resultados analizados son categorizados en tres grupos diferenciados por el avance los cuales son mostrados a continuación.

Avance (mm/rev)		
0,562	0,3377	0,112
Velocidad de corte (m/min)		
170,49	254,47	254,47
Profundidad (mm)		
4	6	4

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Debido a que la velocidad de corte no distingue entre operación de cilindrado, así como de refrentado por lo tanto la velocidad de corte obtenida es válida para operación de refrentado utilizando un diámetro medio debido a la variación constante debido a la operación.
- Los acabados superficiales del proceso de cilindrado son categorizados utilizando los promedios de los datos de los ensayos de comprobación como se muestra a continuación:

Avance 0,112 ($\frac{mm}{rev}$)		
Velocidad de corte 254,47 ($\frac{m}{min}$)		
Rugosidad	N	Caracterización
1,682	N16	SEMI FINO

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Avance 0,337 ($\frac{mm}{rev}$)		
Velocidad de corte 254,47 ($\frac{m}{min}$)		
Rugosidad	N	Caracterización
3,828	N15	REGULAR

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Avance 0,562 ($\frac{mm}{rev}$)		
Velocidad de corte 170,49 ($\frac{m}{min}$)		
Rugosidad	N	Caracterización
5,482	N15	REGULAR

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Los resultados obtenidos son realizados con la cuchilla de parámetros geométricos óptimos.

- Los parámetros geométricos de la cuchilla de refrentado óptimos son el resultado de la mejora de los parámetros geométricos óptimos de cilindrado

mediante la aplicación del método Taguchi, los parámetros óptimos son los siguientes:

Parámetro	Valor
Ángulo de punta	3 °
Ángulo de despullo	4 °
Ángulo de ataque	8 °
Radio de punta	0,5 mm

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Los acabados superficiales del proceso de refrentado son categorizados utilizando los promedios de los datos de los ensayos de comprobación como se muestra a continuación:

Avance 0,118 ($\frac{mm}{rev}$)		
Velocidad de corte 254,47 ($\frac{m}{min}$)		
Rugosidad	N	Caracterización
1,562	N17	FINO

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Avance 0,348 ($\frac{mm}{rev}$)		
Velocidad de corte 254,47 ($\frac{m}{min}$)		
Rugosidad	N	Caracterización
4,135	N15	REGULAR

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

Avance 0,406 ($\frac{mm}{rev}$)		
Velocidad de corte 170,49 ($\frac{m}{min}$)		
Rugosidad	N	Caracterización
4,405	N15	REGULAR

Elaborado por: Christian Carvajal y Juan Cocha.

- Los resultados obtenidos son realizados con la cuchilla de refrentado con parámetros geométricos óptimos. El valor de avance en el refrentado es diferente que en el cilindrado por lo tanto se utiliza el avance más cercano disponible.
- El impacto económico no pudo ser cuantificado debido a que la investigación es de fase experimental, es decir, ha sido elaborada para usos de laboratorios de aprendizaje donde la aplicación de estos parámetros no refleja resultados económicos.

RECOMENDACIONES

- Para lograr mejores resultados se debe garantizar a la medida de las posibilidades un material homogéneo donde no exista presencia de vacíos en el material, así como otros defectos de fabricación.
- Para garantizar que el radio de punta de la herramienta se encuentre perfectamente afilado, se recomienda encontrar un mecanismo el cual debe estar enfocado en la elaboración de dichos radios, el cual no sea costoso de adquirir para posteriores afilados y así lograr que la herramienta sea reutilizable cuando exista desgaste.
- Estos resultados pueden fortalecerse realizando un estudio sobre la reacción del material mediante capturas de una cámara térmica y así analizar si existe variación de las propiedades del material.
- Se recomienda realizar un control del desgaste de la herramienta dado que se debe conocer hasta qué punto la herramienta puede mantener el acabado superficial.
- Se sugiere realizar un seguimiento de los parámetros tanto de mecanizado como geométricos determinados en este estudio, aplicándolos a nivel industrial para cuantificar de manera real el alcance económico, así como el comportamiento de dichos parámetros.

REFERENCIAS

- [1] D. Giancoli, Física, principios con aplicaciones, México: Pearson educación, 2006.
- [2] W. Callister, Ciencia e ingeniería de los materiales, Barcelona: Editorial Reverté S.A., 2007.
- [3] W. Smith y J. Hashemi, Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, México: McGRAW-HILL/INTERAMERICA EDITORES, 2006.
- [4] M. Groover, Fundamentos de manufactura moderna tercera edición, México D. F.: McGraw-Hill, 2007.
- [5] PLASTIM Ltd, «Nylon 6 Extruded (Natural) Data Sheet,» Enero 2015. [En línea]. Available: www.plastim.co.uk.
- [6] PLASTIM Ltd, «Nylon6 Extruded (Black) Data Sheet,» enero 2015. [En línea]. Available: www.plastim.co.uk.
- [7] P. Neis, N. Ferreira, J. Poletto, J. Sukurmaran, M. Andó y Y. Zhang, «Tribological behavior of polyamide-6 plastics and their potential use in industrial applications,» *WEAR*, pp. 1391-1398, 2017.
- [8] PLASTIM Ltd., «Nylon 6 +30% GF Data Sheet,» Enero 2015. [En línea]. Available: www.plastim.co.uk.
- [9] J. Rajesh y J. Bijwe, «Investigations on scratch behaviour of various polyamides,» *WEAR*, n° 259, pp. 661-668, 2004.
- [10] F. Gil Mur, C. Aparcio, J. Manero, D. Rodriguez y J. Arandés, Aleaciones ligeras, Barcelona: Edicions UPC, 2001.
- [11] S. Kalpakjian y S. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición Volumen 1, México: PEARSON, 2008.
- [12] T. Gomez, J. Navarro, E. Agueda y J. Garcia, Estructuras del Vehículo, Madrid: Paraninfo S.A., 2016.
- [13] S. Kalpakjian y S. Schmid, Manufactura, Ingeniería y tecnología Volumen 2. Procesos de manufactura, México: Pearson, 2014.

- [14] A. Leyensetter, Tecnología de los oficios metalúrgicos, Barcelona: Editorial Reverté, 1984.
- [15] EMCO GROUP, Gesellschat: EMCO GROUP, 2017.
- [16] L. Lesur, Manual del torno para metal, México D.F.: Editorial Trillas, 1997.
- [17] J. Bralla, Handbook of manufacturing processes, New York: Industrial press Inc., 2007.
- [18] C. Solar Gonzalez, Problemas de tecnología del torno, Leon: Editorial Everest, 1974.
- [19] ASM INTERNATIONAL, ASM HANDBOOK VOLUME 16, Ohio: ASM Handbook Committee, 1989.
- [20] N. Larburu, Máquinas Prontuario, Madrid: Paraninfo, 1989.
- [21] S. Krar y A. Check, Tecnología de las máquinas herramientas, México D.F: Alfaomega Grupo Editor, 2002.
- [22] V. López, Mecánica de taller - Metrologia II Torno y fresadora, Madrid: Cultural, 1987.
- [23] BÖHLER UDDEHOLM, «BÖHLER UDDEHOLM,» [En línea]. Available: http://www.bucorp.com/media/H13_data_sheet_09032013.pdf.
- [24] A. Feiler y R. Schmidt, Tecnología de los metales, Barcelona: Editorial Reverté, 1984.
- [25] C. A. Erazo Yépez, «Repositorio digital EPN,» [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10318/3/CD-6146.pdf>.
- [26] LAMINA TECHNOLOGIES, «Lamina Technologies Technical Formulas (Metric),» [En línea]. Available: https://docs.wixstatic.com/ugd/175cac_7c9b5c34990740389771d4f04ba00eb1.pdf.
- [27] J. Mata, C. Álvarez y T. Vidondo, Dibujo mecánica 2, Barcelona: edebé, 1981.
- [28] Mitutoyo America Corporation, «PORTABLE SURFACE ROUGHNESS TESTER,» de *Mitutoyo SJ 210*, Aurora Illinois, Julio 2016, p. 12.

- [29] T. Rajasekaran , K. Palanikumar y S. Arunachalam, «Investigation on the turning parameters for surface roughness using taguchi analysis,» *Procedia Engineering*, pp. 781-790, 2013.
- [30] S. Athreya y D. Y. D. Venkatesh, «Application Of Taguchi Method For Optimization Of Process Parameters In Improving The Surface Roughness Of Lathe Facing Operation,» *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, vol. 1, n° 3, pp. 2319-1821, 2012.
- [31] A. Aggarwal, H. Singh, P. Kumar y M. Singh, «Optimizing power consumption for CNC turned parts using response surface methodology and Taguchi's technique— A comparative analysis,» *Journal of materials processing technology*, vol. 200, pp. 373-384, 2008.
- [32] H. Singh y P. Kumar, «Tool wear optimization in turning operation by Taguchi method,» *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, vol. 11, pp. 19-24, 2004.
- [33] Minitab.com, «Soporte de Minitab 18,» [En línea]. Available: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/taguchi-designs/>.
- [34] M. Nalbant , H. Gökkaya y G. Sur, «Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning,» *Materials & Design*, vol. 28, pp. 1379-1385, 2006.
- [35] M. Triola, Estadística, México: Pearson Educación de México, 2004.
- [36] S. Bhopale, P. Darade, S. Kamat y G. Lamdhade, «Consequence of Cutting Parameters on Residual Stresses of AISI 1018 Cold Rolled Steel,» *Materialstoday: proceedings*, vol. 4, pp. 2445-2453, 2017.
- [37] R. Roy, A PRIMER ON THE TAGUCHI METHOD, Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2010.
- [38] R. Roy, A Primer on the Taguchi method, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1990.

- [39] K. L. Castro Vera, «Repositorio Institucional de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12133/1/T-ESPE-053505.pdf>.
- [40] J. G. Chanataxi Gualotuña y R. X. Villacis Arce, «Universidad Politécnica Salesiana Ecuador Repositorio Digital,» Enero 2018. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14971>.
- [41] R. Ranjit, A PRIMER ON THE TAGUCHI METHOD, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2010.
- [42] P. Sánchez , M. Ojeda, G. Luis y M. Zamora, Afilado de herramientas, Boyacá: Cervantes impresores, 1990.
- [43] M. Groover, Introducción a los procesos de manufactura, México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES , 2012.